



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Physique et chimie de l'atmosphère*

Présentée et soutenue par

Romain BAGHI

Le *23 avril 2013*

Titre :

Émissions biogéniques de composés organiques volatils
en région méditerranéenne : développement instrumental,
mesures et modélisation

JURY

Jean-Luc ATTIE (Président du jury)

Marc AUBINET (rapporteur)

Benjamin LOUBET (rapporteur)

Michael STAUDT (examineur)

Pierre DURAND (directeur de thèse)

Corinne JAMBERT (co-directrice de thèse)

Claire DELON (co-directrice de thèse, invitée)

Ecole doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche : Laboratoire d'Aérodynamique UMR-5560

Directeur(s) de Thèse : Pierre DURAND, Corinne Jambert, Claire Delon

Rapporteurs : Marc AUBINET, Benjamin LOUBET

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu mon directeur de thèse, Pierre Durand et mes co-directrices, Corinne Jambert et Claire Delon qui ont encadré mon travail de thèse pendant ces 3 années. Je les remercie pour le savoir qu'ils ont su me transmettre, pour leur disponibilité et leurs encouragements tout au long de la thèse. Merci à Pierre Durand toujours prêt à prendre le feutre pour ces démonstrations au tableau sur la théorie de la turbulence dans la couche limite. Merci à Corinne pour sa persévérance à toute épreuve et son souci du détail ainsi qu'à Claire pour son relativisme et sa perspicacité.

Je souhaite remercier Mr Jean Luc Attier pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance ainsi que Messieurs Marc Aubinet et Benjamin Loubet qui ont pris le temps d'évaluer mon manuscrit de thèse et m'ont prodigué leur encouragements. Merci à Mr Michael Staudt pour sa participation en tant qu'examineur au jury de soutenance et ses remarques pertinentes.

Un grand merci à Christian Jarnot du service électronique du laboratoire pour son travail en labo et sur le terrain, ainsi que son implication dans le projet MEDEE. Merci également à Jean-Michel Martin pour son aide sur le projet MEDEE. Je remercie aussi Guillaume Sokoloff, stagiaire au service électronique pour son travail sur le système MEDEE.

Merci à Romain Mathon, Nicolas Striebig et Driss kouach du groupe d'instrumentation scientifique de l'Observatoire Midi-Pyrénées pour leur travail de conception sur la partie mécanique du système de prélèvement de MEDEE. Merci à Romain et Nicolas pour les superbes rendu 3D de MEDEE.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Allan Hills qui depuis les USA m'a guidé pour l'optimisation et la réparation de l'analyseur d'isoprène.

J'aimerais remercier spécialement Ilja Reiter de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) pour avoir accueilli notre expérience et m'avoir apporté son aide technique avec le matériel d'escalade pour l'installation de MEDEE en haut de l'échafaudage. Je remercie aussi Thierry Gauquelin responsable de l'Observatoire du Chêne (O3HP) ainsi que toute l'équipe de l'OHP sans qui mes mesures sur le terrain n'auraient pas été possibles.

Merci à Eric Ceshia et Pascal Keravec du laboratoire CESBIO pour leur aide et leur collaboration sur le site de Lamasquère.

Je tiens aussi à remercier l'équipe SAFIRE pour leur soutien et leur aide lors de l'intégration dans l'avion de MEDEE et pendant les vols de la campagne TRAQA.

Enfin je n'oublie pas de remercier les doctorants du LA avec qui j'ai partagé de bons moments. Merci à Chandu, Florian, Susanna, Fiona, Simon, Yvan et tout les autres (la liste est longue). Merci aussi à toutes les personnes du laboratoire d'aérodynamique que j'ai sollicitées et qui m'ont aidé dans mon travail.

Résumé

Les Composés Organiques Volatils (COV) jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère et participent à la formation de polluants secondaires comme l'ozone et les aérosols organiques. Les émissions biogéniques de COV dominent d'un facteur dix les émissions anthropiques à l'échelle globale mais leur caractérisation à l'échelle régionale est incertaine. Les progrès en modélisation de la chimie atmosphérique passent par l'amélioration des inventaires d'émissions, ce qui nécessite des mesures de flux in situ. Ces travaux portent sur l'étude des émissions de COV biogéniques par les végétations méditerranéennes dans le cadre du programme ChArMEx (Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment) qui vise à concentrer les efforts scientifiques sur l'étude de la chimie et des aérosols de l'atmosphère du bassin méditerranéen.

La méthode Eddy Covariance (EC) permet de quantifier directement les échanges d'espèces chimiques entre la surface et l'atmosphère. Cette méthode constitue une référence pour les mesures de flux mais n'est applicable qu'à un nombre limité d'espèces car elle requiert la mesure rapide ($\sim 0,1$ s) et simultanée de la concentration du composé étudié ainsi que de la vitesse du vent vertical. Afin d'élargir le champ de mise en œuvre de cette technique d'autres solutions dérivées de l'EC ont été proposées, dont la méthode Disjunct Eddy Covariance (DEC) qui a pour particularité de réduire la contrainte sur la mesure rapide de l'espèce chimique tout en gardant une précision acceptable sur le calcul du flux.

Dans le cadre de ces travaux de thèse un système de prélèvement a été développé pour mettre en œuvre la mesure de flux de COV par la méthode DEC. Ce dispositif appelé MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) repose sur une technologie nouvelle qui permet une capture rapide d'un échantillon d'air et assure son transfert à pression constante vers un analyseur connecté en ligne. Il est composé de deux "seringues mécaniques" actionnées par des vérins électriques dont le fonctionnement est alterné pour alimenter en continu l'analyseur. Trois électrovannes disposées à l'entrée de chaque réservoir dirigent le flux d'air en fonction du cycle de fonctionnement. L'ensemble du système est cadencé par un microcontrôleur avec une précision à la milliseconde. Le système de prélèvement a été réalisé en matériaux inertes chimiquement pour éviter la dégradation de l'échantillon et être compatible avec les espèces en trace réactives.

MEDEE a été testé et validé pour les mesures de flux au sol et en avion lors de deux campagnes de terrain. Le système MEDEE a ainsi permis, lors de deux campagnes de mesures pendant les étés 2010 et 2011 au-dessus d'une forêt de chênes pubescents, de mesurer les flux d'isoprène grâce à un couplage avec un analyseur adapté (Fast Isoprene Sensor). Un réseau de neurones artificiels (RNA) a ensuite été utilisé pour déterminer une paramétrisation des flux d'isoprène en fonction des paramètres environnementaux à partir des observations des campagnes de mesures. La modélisation des émissions d'isoprène a été validée pour les conditions environnementales rencontrées. Cette paramétrisation servira dans un modèle de chimie atmosphérique à l'étude de l'impact des émissions de COV biogéniques sur la qualité de l'air.

mots clés : *composés organiques volatils biogéniques, COVB, mesures de flux, émissions, isoprène, Quercus Pubescens, disjunct eddy covariance, DEC*

Abstract

Volatile Organic Compounds (VOC) play an important role in atmospheric chemistry and are involved in the formation of secondary atmospheric pollutants as ozone and organic aerosols. Biogenic emissions of volatile organic compounds are tenfold greater than anthropogenic emissions on a global scale but their characterization remains uncertain regionally. Advances in atmospheric chemistry modeling rely on better emission inventory which needs in situ flux measurement. This work focuses on biogenic VOC emissions from Mediterranean vegetation in the frame of ChArMEx (Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment) that aims to concentrate scientific effort to study atmospheric chemistry and aerosols in the Mediterranean region.

The Eddy Covariance (EC) method allows direct measurement of trace gas exchange between the surface and the atmosphere. EC is a reference method for flux measurement but is adapted to only a limited number of trace gas species because it requires simultaneous fast measurement (~ 0.1 s) of the species concentration and vertical wind speed. In order to broaden the range of applicability of this method, several other methods derived from EC have been proposed. Among these, the Disjunct Eddy Covariance (DEC) method relaxes the constraint on fast concentration measurement while preserving good accuracy on the flux calculation.

In the frame of this PhD work, a sampling system dedicated to the DEC method for VOC flux measurement was developed. This device called MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) relies on a novel technology that allows the rapid capture of an air parcel and insures its transfer at a constant pressure towards an on-line analyzer. It is composed of two mechanical syringes moved by electric actuators with an alternated functioning to supply continuously the analyzer. Three solenoid valves are installed on each reservoir to drive the sample flow depending on the cycle. A micro controller chip is used to give the rhythm of the whole system with millisecond accuracy. This sampling system has been built in chemically inert materials to avoid sample contamination or destruction; this makes MEDEE fully compatible with reactive species.

MEDEE has been tested and validated on ground and aboard an aircraft, during two field campaigns. It was coupled to a fast isoprene sensor for BVOC flux measurements during two field campaigns in summers 2010 and 2011 above a downy oak forest. A Neural Network (NN) approach has been used to derive a biogenic VOC emission algorithm from these canopy level measured fluxes and concurrent environmental parameters. Isoprene emission modeling has been validated for the observed environmental conditions. In the future, such emission parameterization will be implemented in a coupled chemistry-dynamics model to study the impact of biogenic VOC emissions on air quality.

keywords : *biogenic volatile organic compounds, BVOC, flux measurements, emissions, isoprene, Quercus Pubecens, disjunct eddy covariance, DEC*

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	5
1 Introduction	11
1.1 Contexte Général et Scientifique	11
1.2 Objectifs de la thèse	14
2 Micrométéorologie et mesure de flux	17
2.1 Introduction	17
2.2 La couche limite atmosphérique	17
2.2.1 Les origines de la turbulence dans la CLA	17
2.2.2 Définition de la CLA	20
2.2.3 Les états de la couche limite atmosphérique	21
2.3 Description théorique de la CLA	23
2.3.1 Les équations de base	23
2.3.2 Hypothèses de simplification	25
2.3.3 Approche statistique	25
2.3.4 La couche de surface	26
2.3.5 Les échanges à la surface	28
2.4 Les techniques de mesure de flux	30
2.4.1 La méthode des chambres	31
2.4.2 Les méthodes de micrométéorologie	32
2.4.3 La technique Eddy Covariance (EC)	33
2.4.4 La technique Relaxed Eddy Accumulation (REA)	34
2.4.5 La technique des gradients	35
2.4.6 La technique Disjunct Eddy Covariance (DEC)	35
2.5 Conclusion	39
3 Les composés organiques volatils	41
3.1 Introduction	41
3.2 Les émissions de COV biogéniques	42
3.2.1 Principaux COV émis par la végétation	42
3.2.2 Les mécanismes de synthèse des COV dans les végétaux	43
3.2.3 Rôles écophysiologiques de la production et de l'émission des COV	44
3.2.4 Processus d'émissions au niveau de la plante	45
3.2.5 Facteurs de régulation des émissions	46
3.3 Les COV dans l'atmosphère	48

3.3.1	Les COV, précurseurs de l’ozone troposphérique	49
3.3.2	Rôle des COV dans la formation d’aérosols organiques secondaires	53
3.4	Modélisation des émissions de COV biogéniques	54
3.5	Conclusion	57
4	Développement instrumental : MEDEE	59
4.1	Introduction	59
4.2	Analyse d’un prototype existant	59
4.3	Définition du besoin et cahier des charges	61
4.3.1	Énoncé du besoin	61
4.3.2	Résumé du cahier des charges	63
4.3.3	Préconcepts	63
4.4	Conception et mise au point de MEDEE	67
4.4.1	Conception et réalisation de la partie mécanique du système de prélèvement	68
4.4.2	Réalisation de la partie contrôle/commande	72
4.4.3	Améliorations de MEDEE	75
4.5	Filières de post-traitement des données	76
4.5.1	Mise en forme des données	76
4.5.2	Datation des échantillons	78
4.6	Conclusion	80
5	Validation de MEDEE	81
5.1	Introduction	81
5.2	Validation de l’instrument MEDEE au sol	81
5.2.1	Le site de mesures, Lamasquère	81
5.2.2	Dispositif expérimental	82
5.2.3	Traitement des données	83
5.2.4	Comparaison des flux EC avec les flux DEC simulée	87
5.2.5	Comparaison des flux EC avec les flux DEC	89
5.3	Validation de la version aéroportée de MEDEE	91
5.3.1	La campagne TRAQA, dispositif expérimental	92
5.3.2	Procédures de vol	97
5.3.3	Traitement des données	98
5.3.4	Résultats	100
5.4	Conclusion	102
6	Mesures des flux d’isoprène	103
6.1	Introduction	103
6.2	Stratégie expérimentale	103
6.2.1	Choix du site de mesures	103
6.2.2	Choix du dispositif expérimental	104
6.3	Description du site de l’OHP	105
6.3.1	Description géographique et climatologique du site	105
6.3.2	Étude de l’empreinte des mesures de flux ou footprint	107
6.3.3	La chênaie pubescente	109
6.4	Description du dispositif expérimental	110
6.4.1	La station de mesure de flux	110

6.4.2	La station météorologique	111
6.4.3	L'analyseur d'isoprène, Fast Isoprene Sensor (FIS)	112
6.5	Résultats	116
6.5.1	Conditions de la campagne	116
6.5.2	Mesures de flux	116
6.6	Conclusion	123
7	Modélisation, réseau de neurones artificiels	125
7.1	Introduction	125
7.2	L'approche statistique, les réseaux de neurones artificiels	125
7.2.1	Concept	125
7.2.2	Avantages	126
7.2.3	Mise en œuvre du réseau de neurones	128
7.3	La paramétrisation des flux d'isoprène	128
7.3.1	Élaboration de l'équation	128
7.3.2	Généralisation de l'équation et comparaison avec l'algorithme G93 .	133
7.3.3	Étude de sensibilité des algorithmes RNA et G93	137
7.4	Conclusion	139
8	Conclusion générale et perspectives	141
8.1	Conclusion	141
8.2	Perspectives	142
	Bibliographie	143
	Annexes	159
A	Cahier des charges du système de prélèvement de MEDEE	159

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte Général et Scientifique

La pollution de l'air fait partie des principaux problèmes de santé environnementale auxquels sont confrontés les gouvernements. Elle représente une menace pour la santé des humains, des écosystèmes et de la biosphère en général. Bien que ces effets soient plus visibles à l'échelle régionale, la pollution de l'air est un problème mondial qui implique des modifications à court terme et à long terme du climat. On peut donner comme exemple le nuage brun qui recouvre une partie du continent asiatique en été. Observé par satellite, cette brume constituée de particules réduit le rayonnement solaire et perturbe le régime des moussons. Elle est aussi responsable d'une réduction de la production agricole dans certaines régions et de milliers de décès prématurés dus à des maladies respiratoires (*Ramanathan et al.*, 2001, 2002; *Srinivasan and Gadgil*, 2002; *Mitra*, 2004). La compréhension des processus chimiques et des mécanismes dynamiques responsables de la transformation, du transport et de la diffusion des polluants injectés dans l'atmosphère depuis la surface terrestre, se révèle être un réel enjeu pour prévoir et agir en conséquence afin de limiter la dégradation de la qualité de l'air.

Les composés organiques volatils (COV) sont des molécules chimiques de structures très variées que l'on retrouve à l'état gazeux dans notre atmosphère. Ils jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère à cause de leur forte réactivité et participent à la formation de polluants secondaires comme l'ozone et les particules fines (aérosols organiques secondaires). Ces deux espèces sont les polluants atmosphériques majoritairement en cause dans la plupart des cas de dépassement de seuil réglementaire en France et dans les grandes agglomérations dans le monde. La réduction de leur concentration est donc un enjeu majeur pour améliorer la qualité de l'air. Cette tâche est d'autant plus complexe que ces polluants ne sont pas directement émis à la surface mais sont le résultat de réactions photo-chimiques qui ont lieu dans l'atmosphère. Il est donc nécessaire d'identifier et d'étudier les précurseurs de cette pollution et de comprendre les processus physico-chimiques qui déterminent leur concentrations.

Les modèles numériques sont des outils qui permettent l'étude et la prévision de ces phénomènes par des simulations. La validité des modèles repose néanmoins sur des observations. En tant que précurseurs de polluants atmosphériques, les COV ainsi que leur sources doivent faire l'objet d'une attention particulière.

On différencie deux catégories de sources de COV pour l'atmosphère : les sources naturelles (principalement la végétation) et les sources anthropiques. À l'échelle mondiale,

la végétation est responsable d'environ 90 % des émissions de COV contre 10 % pour les activités humaines (*Fuentes et al.*, 2000). Si les sources anthropiques sont relativement bien connues, il n'en est pas de même pour les sources naturelles dont les estimations sont entachées de grandes incertitudes (*Simpson et al.*, 1995). La cartographie des sources naturelles de COV sous forme de cadastres d'émissions est actuellement peu fiable et incomplète, en partie à cause de la difficulté que représente la mise en œuvre des mesures de flux de COV et de la grande diversité et variabilité des sources. Il est donc nécessaire d'améliorer les techniques de mesure et de multiplier les mesures in-situ pour étoffer ces bases de données.

La couche limite atmosphérique (CLA) est la première couche de l'atmosphère. En contact direct avec la surface et d'une épaisseur comprise entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres, la couche limite est le siège des échanges d'énergie et de matière entre la surface terrestre et l'atmosphère. Chauffé par le rayonnement solaire, le sol est la principale source de chaleur de l'air dans la troposphère. En effet, une partie de cette énergie est transmise à l'air près du sol par conduction. Cet air plus chaud devient moins dense que l'air environnant et est soulevé par la poussée d'Archimède. Le transport convectif qui en résulte est un des phénomènes qui caractérise la couche limite. Son effet, en plus du transport dynamique (cisaillements de vent) est de mélanger efficacement les polluants émis à la surface, dans toute l'épaisseur de la couche limite.

En s'appuyant sur les propriétés de la couche limite, la méthode Eddy Covariance (EC) permet d'estimer, à l'échelle d'un écosystème, les émissions d'espèces en trace à la surface terrestre. Cette méthode présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles (chambres statiques ou dynamiques, décrites à la section 2.4) puisqu'elle ne perturbe pas l'environnement de la source et est représentative d'une surface étendue. La méthode EC requiert cependant la mesure rapide de la composante verticale du vent ainsi que celle de la concentration de l'espèce étudiée, le flux étant proportionnel à la covariance de ces deux paramètres. Ces mesures micro-météorologiques sont réalisées avec des capteurs dont le temps de réponse est très court (de l'ordre de 0,1 s). Il n'est pas possible d'utiliser cette technique pour estimer les flux d'espèces pour lesquelles il n'existe pas d'analyseurs suffisamment rapides et précis. Cette limitation pose problème pour de nombreuses espèces et notamment les COV. Une nouvelle technique a été développée pour permettre l'utilisation de capteurs plus lents et ainsi élargir les mesures de flux à un nombre d'espèces plus important.

Dérivée de la méthode EC, la méthode Disjunct Eddy Covariance (DEC) se différencie par une mesure discontinue de la concentration de l'espèce étudiée pour rallonger le temps d'analyse. Elle va donc autoriser l'utilisation d'analyseurs plus lents. Cependant, la capture de l'échantillon doit être rapide et datée précisément pour être associée à la vitesse du vent vertical au moment de la capture. La mise en œuvre de la DEC nécessite l'utilisation d'un dispositif de prélèvement couplé à un analyseur.

Durant ces travaux de thèse, un système de prélèvement dédié à la méthode DEC a été développé, testé et déployé sur le terrain pour mesurer les flux de COV. Les efforts ont été concentrés sur l'étude des émissions des végétations méditerranéennes car le bassin méditerranéen fait actuellement l'objet d'une attention particulière. En effet un programme international multi-disciplinaire baptisé MISTRALS (Mediterranean Integrated STudies at Regional and Local Scales) a été mis en place dans le but d'initier une dynamique scientifique forte sur le système méditerranéen dans un contexte de changement climatique et de forte pression environnementale. Parmi les sept grandes thématiques qui composent le

programme MISTRALS, c'est dans la thématique "chimie de l'atmosphère" (programme *ChArMEx*) que s'inscrit cette thèse.

Le programme *ChArMEx* (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment), a pour but scientifique d'étudier la chimie atmosphérique et l'aérosol dans la partie occidentale du bassin méditerranéen et leur impact sur le climat régional, la qualité de l'air et la biogéochimie. Cette initiative française est motivée par plusieurs lacunes. Premièrement les concentrations de fond d'ozone troposphérique en méditerranée ne semblent pas diminuer alors que les émissions anthropiques en Europe ont été fortement réduites. Ensuite les estimations du forçage radiatif des aérosols semblent surpasser régionalement celles des gaz à effet de serre additionnels dus à l'homme, mais restent très variables et incertaines et sont mal prises en compte dans les modèles d'évolution du climat (*Bergamo et al.*, 2008; *Mallet et al.*, 2006). Les enjeux majeurs de ce programme sont de concentrer les efforts sur la compréhension des bilans troposphériques en espèces en traces, de leur tendances et de leurs divers impacts sur le climat régional, sur la qualité de l'air et sur la biogéochimie marine.

Les objectifs sont axés sur l'étude des relations entre la qualité de l'air méditerranéen et le transport (effets locaux, pollution à distance, échanges verticaux, ...), de l'évolution chimique des masses d'air au-dessus du bassin et les processus de formation d'espèces secondaires (ozone, aérosols organiques, ...), des impacts radiatifs des espèces en traces (évaporation, profil thermique atmosphérique, ...), des tendances saisonnières à long terme et de la variabilité spatiale des concentrations et de la quantification du dépôt d'espèces impactant la chaîne trophique marine (Hg, Fe, P, ...).

La réalisation d'inventaires d'émissions plus complets (sources biogéniques de COV, poussières désertiques, sources anthropiques de Fe et P, combustion de biomasse et feux domestiques, émissions par les navires, le trafic routier et les industries) fait aussi partie des objectifs, ainsi que la création d'une métabase inédite de données atmosphériques régionales, l'inter-comparaison des modèles chimie-transport avec de nouveaux jeux d'observation, pour prévoir l'évolution de l'état actuel de la composition chimique de l'atmosphère sur la base de scénarii de changement de climat et d'émissions.

Le programme *ChArMEx* s'appuie sur la combinaison de simulations multi-échelles et d'observations sur le terrain. Les moyens expérimentaux mis en œuvre incluent les observations satellites, la création de stations de mesures et le renforcement des réseaux d'observation existants. Ces outils seront déployés sur le long terme (10 ans au moins) avec une intensification des observations sur une période plus courte, de 2-3 ans, à partir de 2011.

Sur le court terme, deux campagnes intensives ont été planifiées. La première campagne a eu lieu à l'été 2012. Intitulée TRAQA pour TRAnsport à longue distance et Qualité de l'Air, cette pré-campagne a mobilisé en plus des moyens au sol, un avion de recherche et des ballons équipés de sondes pour étudier le vieillissement des masses d'air polluées en provenance du continent. La campagne principale du programme *ChArMEx* aura lieu à l'été 2013 et concentrera le maximum d'observations possibles au sol et dans les airs. L'objectif reste l'étude du transport des masses d'air continentales sur la mer, leur vieillissement chimique et leur impact radiatif.

Le programme *ChArMEx* a été précédé d'autres études de chimie atmosphérique dans le bassin méditerranéen, notamment ESCOMPTE (Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emission) dans la région de Marseille/Fos/Berre dédiée aux problèmes de pollution atmosphérique en milieux urbains

et péri urbains (*Cros et al.*, 2004; *Simon et al.*, 2005). Auparavant le programme BEMA (Biogenic Emission in the Mediterranean Area) avait permis de fournir des informations sur les flux de COV biogéniques à l'échelle locale (*Kesselmeier et al.*, 1996).

1.2 Objectifs de la thèse

L'objectif de ce travail de thèse est double. Il est, dans un premier temps, de développer une solution technique pour la mise en œuvre de la méthode de mesure de flux Disjunct Eddy Covariance (DEC) pour les composés réactifs. Puis, il s'agit dans un second temps de mettre en œuvre cet instrument pour mesurer les émissions de COV des végétations méditerranéennes et de proposer une nouvelle paramétrisation de ces émissions à partir des données expérimentales collectées.

Le développement instrumental a constitué la première partie de ce travail. L'élaboration d'un cahier des charges et l'étude théorique de plusieurs préconcepts menés en amont de la thèse par un étudiant ingénieur en mécanique ont permis de dégager une solution technique adaptée. En collaboration avec le service électronique du laboratoire d'Aérodynamique et du Groupe d'Instrumentation Scientifique de l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées), l'étude de cette solution technique a été approfondie et l'instrument MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) a pu être réalisé.

Plusieurs campagnes de mesures ont été menées pour tester et valider le fonctionnement du dispositif et sa compatibilité avec la méthode DEC ainsi que pour étudier les émissions de COV par les végétations méditerranéennes dans le sud-est de la France. Prévu pour fonctionner aussi en avion, MEDEE a été également testé lors d'une seconde campagne de mesure dédiée à sa validation aéroportée.

La dernière partie de ce travail a consisté à utiliser un réseau de neurones artificiels pour établir la meilleure relation non-linéaire entre les flux de COV et les paramètres environnementaux mesurés simultanément et ainsi améliorer la paramétrisation des flux de COV des végétations méditerranéennes dominantes.

L'ensemble de ces travaux de thèse et résultats sont présentés en 6 chapitres :

- Le chapitre 2 constitue une base théorique pour la météorologie de la couche limite atmosphérique, sur laquelle s'appuient les méthodes que nous avons utilisées pour mesurer les flux. Des rappels sur les généralités et les propriétés de la couche limite sont exposés puis la théorie des différentes méthodes de mesure de flux est décrite, en particulier la méthode Eddy Covariance (EC) et la méthode Disjunct Eddy Covariance qui en dérive.
- Le chapitre 3 reprend l'état des connaissances sur les COV, en particulier les COV d'origine naturelle. Les principales molécules ou familles de molécules présentes dans les émissions naturelles sont illustrées. Puis on s'intéresse aux mécanismes de formation de ces COV dans les végétaux avant d'aborder leurs rôles et les processus qui gouvernent leurs émissions. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la chimie des COV dans l'atmosphère. Le rôle des COV dans la formation de polluants secondaires y est décrit. Une dernière section est consacrée aux paramétrisations des émissions de COV généralement utilisées à l'heure actuelle.

- Dans le chapitre 4, l'instrument MEDEE qui a été développé au cours de la thèse est présenté. Ce chapitre retrace toutes les étapes du projet depuis l'élaboration du cahier des charges à la réalisation de l'instrument. En premier, un résumé du cahier des charges est présenté ainsi que les solutions techniques proposées. Puis le design qui a été choisi pour l'instrument actuel est décrit. Les filières de traitement des données enregistrées par l'instrument sont détaillées.
- Le chapitre 5 est consacré à la validation de l'instrument MEDEE. Les campagnes de mesures effectuées pour validation de l'instrument au sol et en avion sont présentées ainsi que les résultats.
- Le chapitre 6 est dédié à la mesure des émissions de COV par la végétation méditerranéenne. La campagne de mesure des émissions d'isoprène au-dessus d'une forêt de chênes pubescents avec l'instrument MEDEE couplé à un analyseur rapide d'isoprène (FIS) est décrite. Puis les résultats de ces mesures sont présentés.
- Le chapitre 7 aborde la dernière partie de ce travail, c'est à dire l'utilisation des observations faites pendant la campagne de mesures pour modéliser les flux d'isoprène à l'aide d'un réseau de neurones artificiels. L'équation qui relie paramètres environnementaux et émissions d'isoprène à l'échelle de la canopée obtenue pour cette étude est présentée.

Finalement, le chapitre 8 reprend les principales conclusions de ce travail et ouvre vers des perspectives de recherche.

Chapitre 2

Micrométéorologie et mesure de flux

2.1 Introduction

La micrométéorologie est un domaine de la météorologie où l'on s'intéresse aux processus de petites échelles temporelles (< 1 jour) et spatiales (< 1 km). Les premières couches de l'atmosphère sont le principal objet d'étude de la micrométéorologie car les phénomènes de petite échelle y sont dominants. Ce chapitre aborde les définitions théoriques de la couche limite et de la couche de surface pour comprendre les fondements des méthodes de mesures de flux qui seront décrites en détail dans la seconde partie du chapitre.

2.2 La couche limite atmosphérique

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) est le domaine de l'atmosphère directement en contact avec la surface terrestre (surfaces continentales et surface des océans). Il existe un fort intérêt pour l'étude de la couche limite atmosphérique principalement parce qu'elle constitue le siège de la quasi totalité des activités humaines. Sa compréhension et la prévision de ses caractéristiques sont utiles dans de multiples domaines comme l'agriculture, l'urbanisme, l'aéronautique, l'énergétique, ... Par ailleurs, l'étude de la CLA est nécessaire à l'amélioration des modèles atmosphériques et des prévisions du temps et du climat car c'est par l'intermédiaire de la CLA que se font les échanges d'énergie entre surface et atmosphère. Le caractère turbulent des écoulements dans la couche limite atmosphérique lui confère des propriétés uniques au regard du reste de l'atmosphère et rend sa description complexe.

L'atmosphère libre est la couche qui se situe immédiatement au-dessus de la CLA. Dans l'atmosphère libre, les influences de la surface sont imperceptibles du moins à court terme et l'écoulement est géostrophique (équilibre entre la force de Coriolis et forces de gradient de pression). La CLA et l'atmosphère libre constituent la troposphère qui s'étend de 0 à 10-15 km d'altitude.

2.2.1 Les origines de la turbulence dans la CLA

Un écoulement est dit turbulent lorsqu'il présente des mouvements tourbillonnaires désordonnés dans l'espace et dans le temps. A l'opposé, l'écoulement laminaire est régulier et bien décrit par les équations de la mécanique des fluides. Dans la nature, les

écoulements laminaires sont rares et l'on rencontre plus souvent des écoulements turbulents.

Deux nombres sans dimension permettent de caractériser le régime d'un écoulement. Il s'agit du nombre de Reynolds (Re) pour les écoulements d'origine dynamique et du nombre de Rayleigh (Ra) pour les écoulements convectifs d'origine thermique.

Les écoulements d'origine dynamique

Le nombre de Reynolds est défini comme le rapport entre les forces d'Euler (forces d'advection et de pression) et les forces de viscosité :

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \quad (2.1)$$

avec U la vitesse caractéristique de l'écoulement, L la longueur caractéristique de l'écoulement et ν le coefficient de viscosité cinématique du fluide.

Les forces d'Euler ont tendance à créer des hétérogénéités dans l'écoulement tandis que les forces de viscosité entraînent un lissage de ces perturbations. De ce fait, le régime sera laminaire pour un Re petit (effets visqueux dominants) et turbulent pour un Re grand. Il existe donc une valeur critique Re_{cr} qui délimite ces deux régimes (en faisant l'hypothèse d'une transition brutale entre les deux régimes). Par expérience cette valeur est généralement de l'ordre de 3000.

Dans l'atmosphère, on observe un effet de la surface sur l'écoulement jusqu'à une altitude d'environ 1000 m, au-delà dans l'atmosphère libre, les variations du vent sur la verticale ne sont plus liées directement à la surface. Le premier kilomètre de l'atmosphère s'apparente alors à une couche limite dynamique. On peut estimer la valeur du nombre de Reynolds pour la CLA (Re_{CLA}) en prenant une longueur caractéristique de 1000 m et une vitesse caractéristique de 15 m s^{-1} . Le coefficient de viscosité cinématique de l'air sec à 15°C prend une valeur de $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

$$Re_{CLA} = \frac{U.L}{\nu} \approx 10^9. \quad (2.2)$$

Ce calcul donne un nombre de Reynolds pour la CLA très grand devant la valeur critique ($Re_{CLA} \gg Re_{cr}$) et démontre le caractère turbulent de la couche limite dynamique de l'atmosphère.

Les écoulements convectifs d'origine thermique

Du point de vue thermique ou convectif, le nombre de Rayleigh détermine les caractéristiques du mouvement pour un fluide donné. Pour comprendre l'origine des mouvements d'origine thermique, on peut prendre l'exemple d'une expérience simple.

Dans le champ de pesanteur \vec{g} , on place un fluide au repos entre deux plaques planes horizontales séparées par une distance h , puis on porte ces plaques à des températures différentes de façon à maintenir un écart de température δT constant entre les deux plaques. Lorsque la température de la plaque supérieure est plus élevée que la température de la plaque inférieure alors le fluide situé en haut sera plus dilaté et donc plus léger que celui en dessous. Dans ce cas la répartition des masses volumiques sur la verticale est stable et un flux moléculaire de chaleur constant sera établi du haut vers le bas. Lorsque la plaque inférieure est la plus chaude, la masse volumique du fluide en bas sera plus faible

que celle du fluide au-dessus. Cette situation sera instable et déclenchera des mouvements convectifs au sein du fluide si la force de flottabilité (poussée d'Archimède) surpasse les effets de la viscosité. Il existe donc une valeur critique de δT qui détermine la limite entre une situation stable et une situation instable, convective.

Le nombre de Rayleigh Ra est défini comme le rapport des sources d'instabilité et de stabilité et s'écrit :

$$Ra = \frac{g \cdot \alpha \cdot h^3 \cdot \delta T}{\nu \cdot \nu_\theta} \quad (2.3)$$

avec g la gravité, α le coefficient de dilatation du fluide et ν_θ le coefficient cinématique d'échange moléculaire de chaleur. Pour un gaz parfait, cas de l'air dans la CLA, $\alpha \simeq \frac{1}{T}$ avec T la température de la plaque inférieure.

On montre par expérience que les mouvements convectifs apparaissent lorsque le nombre Ra prend une valeur inférieure à -1700. Un régime de transition est observé puis ces mouvements deviennent turbulents pour un nombre de Ra très grand en valeur absolue ($Ra \leq -50000$).

Nous allons voir maintenant pourquoi l'analogie avec l'atmosphère est possible. Si l'on s'intéresse au bilan de chaleur moyen du système terre-atmosphère, 18 % du rayonnement solaire incident est absorbé par la troposphère et 50% par la surface (océans et continents), le reste étant réfléchi vers l'espace. En considérant toutes les longueurs d'ondes, le bilan radiatif moyen de la surface est excédentaire et celui de la troposphère est déficitaire. Sur le long terme, la surface et la troposphère sont des milieux en équilibre lorsqu'on les considère indépendamment. Il existe donc des échanges d'énergie autres que radiatifs entre la surface et l'atmosphère pour maintenir cet équilibre. Ces échanges non radiatifs sont assurés par des transferts verticaux de chaleur latente ($\simeq 20$ %), de chaleur sensible ($\simeq 8$ %), puis par des mouvements fluides turbulents. Ils ont lieu par conduction moléculaire dans les premiers centimètres au contact de la surface, puis par mélange turbulent. Pour la chaleur sensible, le sens de ces échanges est généralement orienté de la surface vers l'atmosphère et s'inverse la nuit sur le continent.

Nous pouvons ici souligner que les 18 % du rayonnement absorbé par la troposphère sont répartis sur une épaisseur de 10 à 20 km tandis que les 50 % du rayonnement absorbé par la surface sont concentrés sur une épaisseur très petite de l'ordre du millimètre pour les surfaces continentales et de l'ordre de quelques mètres pour les océans. On peut ainsi considérer l'atmosphère comme étant chauffée par sa base.

D'un point de vue thermique, la surface va donc avoir une influence significative sur la CLA. Cette influence est illustrée par la figure 2.1, où le profil de température moyen est représenté sur les premières centaines de mètres de l'atmosphère pour différents moments du cycle diurne au-dessus du continent. On remarque que les variations de température pendant un cycle de 24 h sont grandes et sont perceptibles jusqu'à une altitude de l'ordre de 1000 m.

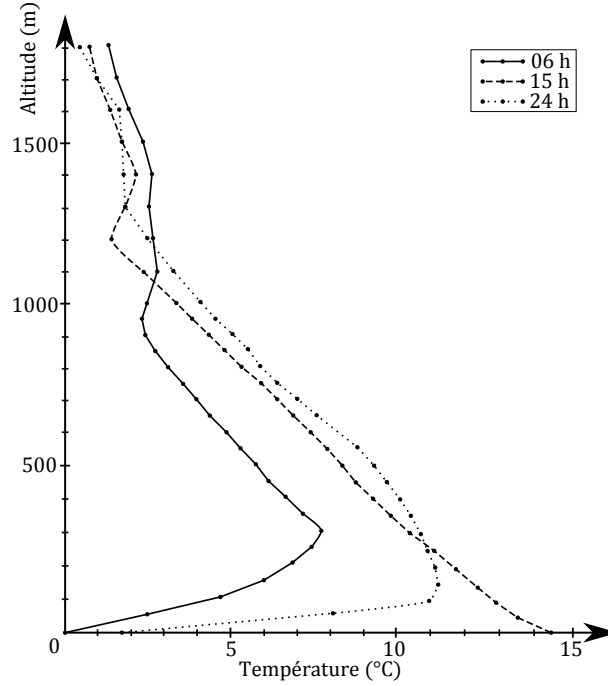


FIGURE 2.1 – Variations du profil de température dans l’atmosphère près de la surface, au-dessus du continent (De Moor, 1996).

Il est difficile de calculer un nombre de Rayleigh global pour la CLA, cependant en faisant l’hypothèse que la valeur de transition à la turbulence de Ra est valide pour la couche limite atmosphérique, il est possible d’estimer un écart de température critique δT_{cr} :

$$\delta T_{cr} = \frac{\nu \cdot \nu_\theta}{(g/T) \cdot h^3} Ra_{cr} \quad (2.4)$$

En prenant pour valeurs $g \simeq 10 \text{ m s}^{-2}$, $T \simeq 300 \text{ K}$, $h = 1000 \text{ m}$ et $\nu_\theta \simeq 2,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (pour l’air sec à 15°C), on trouve un ordre de grandeur pour δT_{cr} dans la CLA de -10^{-12} K . Ce résultat très petit implique que la CLA est assurément turbulente du moins pendant les phases convectives. En pratique, les nombres de Richardson (nombre de Richardson de flux et nombre de Richardson de gradient) sont utilisés pour caractériser la convection dans la CLA plutôt que le nombre de Rayleigh (Stull, 1988).

2.2.2 Définition de la CLA

A partir de ces premiers éléments, on comprend que la couche limite présente un caractère principalement turbulent dû aux interactions avec la surface. Pour résumer, les effets de la surface sur la CLA sont dynamiques (frottements), convectifs (échanges de chaleur sensible et chaleur latente) et varient dans le temps (petites échelles temporelles $\leq 24 \text{ h}$).

La hauteur de la CLA est difficile à définir précisément puisque qu’elle dépend de plusieurs paramètres et varie dans le temps (cycle diurne). Généralement elle est de l’ordre du kilomètre mais peut atteindre un maximum à plus de 2 km lorsque la convection est très développée en milieu de journée. La nuit, l’épaisseur de la CLA peut diminuer fortement jusqu’à atteindre un minimum de quelques dizaines de mètres.

Du caractère turbulent résulte un mélange très efficace de l'air dans la CLA. En effet la turbulence est plusieurs millions de fois plus efficace que la diffusion moléculaire. Cette propriété est très importante car elle signifie que les polluants relâchés dans l'atmosphère depuis la surface seront répandus très rapidement dans la CLA. L'homogénéisation des variables moyennes dans la CLA sera d'autant plus rapide que la turbulence sera intense. Pour étudier la CLA il sera donc important de déterminer l'intensité de la turbulence. L'énergie cinétique turbulente est couramment utilisée comme mesure de l'intensité de la turbulence. L'énergie cinétique turbulente est définie proportionnellement à la variance de la vitesse du fluide, elle est nulle pour un écoulement laminaire et augmente avec la turbulence. Dans la CLA, l'évolution de la turbulence est contrôlée par quatre processus :

- Le cisaillement de vent (production dynamique), généralement source de turbulence.
- La production thermique, peut être une source ou un puits de la turbulence selon la répartition de la masse volumique.
- La dissipation moléculaire, qui résulte des frottements dans un fluide réel, constitue un puits pour la turbulence par conversion d'énergie cinétique de la turbulence en chaleur.
- Le transport, ne crée pas de turbulence mais répartit celle-ci.

2.2.3 Les états de la couche limite atmosphérique

Il existe trois régimes différents dans la couche limite selon le rôle des forces de flottabilité (convection), ou du gradient vertical de masse volumique. Pour décrire ces différents états, on considère dans un premier temps un air sec, et on introduit la température potentielle θ (en Kelvin) qui permet de prendre en compte les effets de la variation de densité. Elle est définie comme étant la température que prendrait la particule d'air si elle était ramenée à une pression de référence P_0 sans échanges de chaleur (transformation adiabatique) :

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{M_a C_p}} \quad (2.5)$$

La température potentielle θ est exprimée en fonction de la température T (K) au niveau de pression P , de la constante universelle des gaz parfaits R ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), de la masse molaire de l'air sec M_a et de la chaleur massique à pression constante de l'air sec C_p . Le flux de flottabilité est défini comme la covariance des fluctuations de w la composante verticale du vent et de la température potentielle θ et s'écrit $\overline{w'\theta'}$.

CLA neutre

L'état neutre apparaît lorsque la température potentielle est constante sur la verticale, c'est à dire quand la densité de l'air est la même à la surface et au sommet de la CLA. Dans ce cas là, la turbulence d'origine thermique est nulle (flux de flottabilité nuls à la surface) et uniquement les effets dynamiques seront présents. Ce cas est peu fréquent et on rencontre un état voisin du cas neutre pendant les phases de transition d'un état stable à un état instable à l'aube et au crépuscule.

CLA stable

Dans le cas stable, la température potentielle de l'air à la surface est plus basse que celle de l'air situé au-dessus (figure 2.2). C'est la surface qui refroidit l'air, le flux de flottabilité est donc négatif.

Dans cette situation, la turbulence préexistante résultant d'une phase convective antérieure ou d'effets dynamiques est détruite et le régime tend vers une stratification du fluide avec peu de mélange sur la verticale. Il en résulte une couche de surface de faible épaisseur, avec un gradient de température sous-adiabatique. Le vent sera faible au voisinage de la surface et l'absence de turbulence entraînera une accumulation des polluants émis dans cette couche. Le vent atteint un maximum marqué au sommet de l'inversion de température comme représenté dans la figure 2.2. Ce phénomène est appelé jet de basse couche. On rencontre fréquemment cet état au cours de la nuit. La couche non convective située au-dessus de la couche d'inversion est appelée couche résiduelle car elle constitue le reste de la convection de la journée précédente.

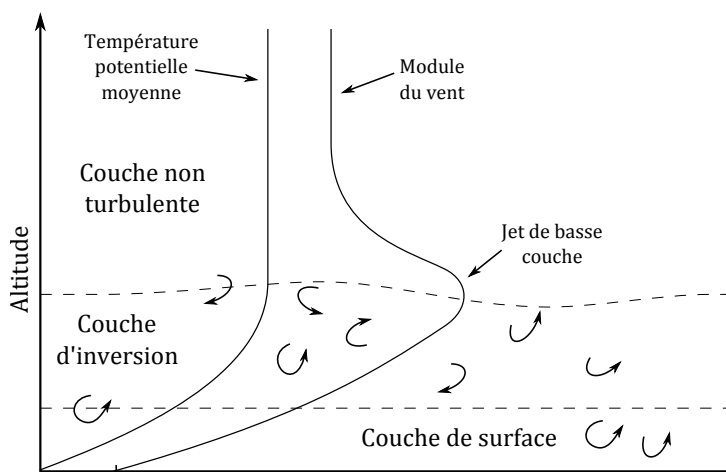


FIGURE 2.2 – Schéma dynamique de la Couche Limite Atmosphérique stable (De Moor, 1996).

L'état stable de la couche limite est très complexe du fait de la faible turbulence et donc de l'importance d'effets habituellement secondaires comme le rayonnement ou la pente du terrain.

CLA instable

La CLA devient instable lorsque la surface réchauffe l'air et que le gradient de température potentielle est négatif (figure 2.3). La production de turbulence d'origine thermique s'additionne à la production dynamique. Il en résulte un brassage efficace des variables sur toute l'épaisseur de la CLA et l'on tend vers une homogénéité verticale. Ce mélange est cependant limité près de la surface par les forces de friction. Des gradients forts y sont donc encore présents.

On observe sur la figure 2.3 trois zones d'intensité de turbulence différentes. Près du sol, la taille des tourbillons est limitée par les frottements. Dans la couche mélangée, la turbulence est très développée et des structures cohérentes sont identifiables (thermiques, cellules convectives). Finalement, la couche d'entraînement marque la limite haute de la CLA instable. Dans cette couche, la turbulence est détruite par la forte stratification présente dans l'atmosphère libre. L'état instable de la CLA se rencontre souvent pendant

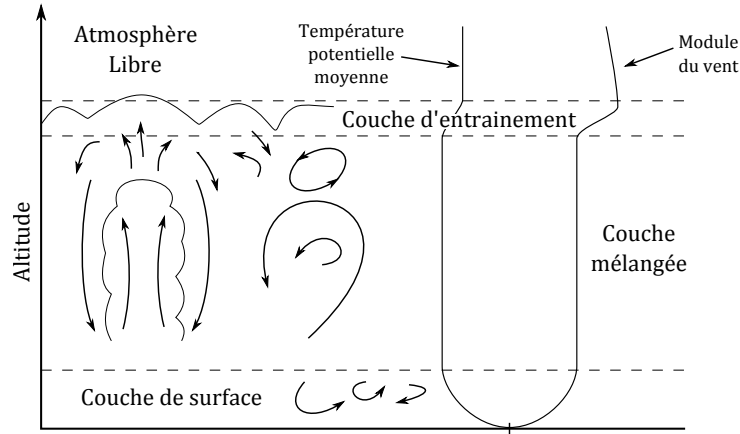


FIGURE 2.3 – Schéma dynamique de la Couche Limite Atmosphérique instable (De Moor, 1996).

la journée et sera d'autant plus caractéristique que l'ensoleillement sera fort. L'épaisseur de la CLA instable augmente au fur et à mesure que la surface se réchauffe et que la convection thermique pénètre dans la couche stable préexistante.

Ces considérations sont faites pour une CLA idéale et pour un air sec. En réalité les mouvements convectifs ne sont pas seulement d'origine thermique. La vapeur d'eau étant un gaz plus léger que l'air, sa présence pourra aussi engendrer de la convection.

Pour prendre en compte ces effets, la température virtuelle T_v est utilisée. Elle correspond à la température que prendrait une particule d'air sec pour avoir la même masse volumique qu'une particule d'air humide. De la même façon, on définit la température potentielle virtuelle θ_v .

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61r) \text{ avec } r = \frac{\rho_v}{\rho}. \quad (2.6)$$

Le rapport de mélange r de l'air humide en kg kg^{-1} est le rapport entre la masse volumique de vapeur d'eau ρ_v et la masse volumique de l'air sec ρ . Le flux de flottabilité est alors calculé avec la température potentielle virtuelle θ_v et s'écrit $\overline{w'\theta'_v}$.

2.3 Description théorique de la CLA

Afin de décrire mathématiquement l'écoulement dans la couche limite atmosphérique on utilise les équations de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Ce système complexe ne peut pas être résolu dans le cas de la CLA si l'on ne fait pas appel à des hypothèses simplificatrices. Dans cette section, les équations de base sont rappelées ainsi que les approximations utilisées pour résoudre ce système.

2.3.1 Les équations de base

Les équations de base pour l'étude de l'écoulement dans la CLA sont explicitées ici pour l'air sec.

Équation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse ou équation de continuité, s'écrit, sous forme lagrangienne :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (2.7)$$

Avec ρ la masse volumique du fluide et \vec{u} la vitesse du fluide. Cette relation indique que la masse volumique d'une particule de fluide diminue lorsque le champ de vitesse est divergent et augmente lorsque celui-ci est convergent. Dans le cas d'un fluide incompressible, la masse volumique ρ est constante et on obtient donc $\text{div}(\vec{u}) = 0$.

Équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement ou équation du mouvement s'écrit (*De Moor*, 1996) :

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{g} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \vec{\text{grad}}(P)}_A - \underbrace{2\vec{\Omega} \wedge \vec{u}}_B + \underbrace{\nu \cdot \Delta \vec{u}}_C \quad (2.8)$$

Cette équation prend en compte l'ensemble des forces qui s'appliquent à une particule d'air, c'est à dire, la force de gravité (\vec{g}), les forces de gradient de pression (A) dirigées des hautes vers les basses pressions, la force de Coriolis avec Ω vitesse de rotation angulaire de la terre (B) et les forces de tension visqueuses avec ν coefficient de viscosité cinématique (C). Pour rappel, Δ correspond à l'opérateur Laplacien.

Équation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie (thermodynamique) a pour expression (*De Moor*, 1996) :

$$\rho \cdot \frac{dC_v \cdot T}{dt} = -P \cdot \text{div}(\vec{u}) + \mu_\theta \cdot \Delta T + \partial \dot{Q} \quad (2.9)$$

avec μ_θ coefficient de conductivité thermique ($\mu_\theta = \kappa_\theta \rho C_p$, κ_θ étant la diffusivité thermique et ρC_p la chaleur spécifique) et $\partial \dot{Q}$ qui représente les échanges de chaleur de la particule d'air avec l'extérieur (par exemple par rayonnement) et qui correspond à un taux de chauffage par unité de masse. Les termes $-P \cdot \text{div}(\vec{u})$ et $\mu_\theta \cdot \Delta T$ correspondent respectivement aux apports de chaleur par compression/détente adiabatique et par conduction moléculaire. La dissipation moléculaire d'énergie cinétique est ici négligée.

Équation des gaz parfaits

La loi des gaz parfaits fait aussi partie des équations de base utilisées couramment dans l'étude de l'atmosphère :

$$P = \rho \frac{RT}{M_a} \quad (2.10)$$

avec M_a la masse molaire de l'air sec.

2.3.2 Hypothèses de simplification

Ce système de quatre équations n'est pas applicable directement pour l'étude de la couche limite et nécessite plusieurs hypothèses simplificatrices qui constituent l'approximation de Boussinesq (*Stull*, 1988; *Businger*, 1982). Ces hypothèses permettent de simplifier considérablement ces équations sans pour autant s'éloigner de la réalité.

Dans ce système, on considère l'air comme un fluide idéal, c'est à dire que sa viscosité, ainsi que sa conductivité thermique sont négligeables. On néglige les variations de densité sauf lorsque celles-ci sont dues aux variations de température et lorsque la densité est couplée à la gravité (\vec{g}), c'est à dire dans la composante verticale de l'équation de conservation de la quantité de mouvement. On admet que l'état thermodynamique de la CLA s'écarte peu d'un état de référence hydrostatique et adiabatique.

Les écarts par rapport à cet état de référence (r) s'écrivent alors :

$$P = P_r(z) + P_1 ; P_1/P_r \ll 1 \quad (2.11)$$

$$T = T_r(z) + T_1 ; T_1/T_r \ll 1 \quad (2.12)$$

$$\rho = \rho_r(z) + \rho_1 ; \rho_1/\rho_r \ll 1 \quad (2.13)$$

$$\theta = \theta_r(z) + \theta_1 ; \theta_1/\theta_r \ll 1 \quad (2.14)$$

Les perturbations P_1 , T_1 , ρ_1 , et θ_1 étant faibles, les termes d'ordre 2 pourront être négligés (sauf pour le terme d'advection) ce qui revient à linéariser le système.

Les équations de base s'écrivent alors :

$$\text{Équation d'état : } \frac{\rho_1}{\rho_r} = -\frac{T_1}{T_r} \quad (2.15)$$

$$\text{Équation du mouvement : } \frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho_r} \vec{\text{grad}}(P) - \frac{T_1}{T_r} \vec{g} - 2\vec{\Omega} \wedge \vec{u} \quad (2.16)$$

$$\text{Équation thermodynamique : } \rho_r C_p \frac{dT_1}{dt} = \mu_\theta \Delta T_1 + \partial \dot{Q} \quad (2.17)$$

2.3.3 Approche statistique

Pour caractériser la turbulence et prendre en compte les fluctuations des paramètres de l'atmosphère, on utilise la décomposition de Reynolds qui sépare pour chaque variable une partie moyenne notée $\bar{\zeta}$ et un terme d'écart à la moyenne noté ζ' . Cette décomposition de Reynolds (*Reynolds*, 1895) s'écrit :

$$\zeta = \bar{\zeta} + \zeta' \quad (2.18)$$

avec

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \zeta(t) dt. \quad (2.19)$$

La figure 2.4 illustre cette décomposition avec l'évolution du scalaire ζ dans le temps.

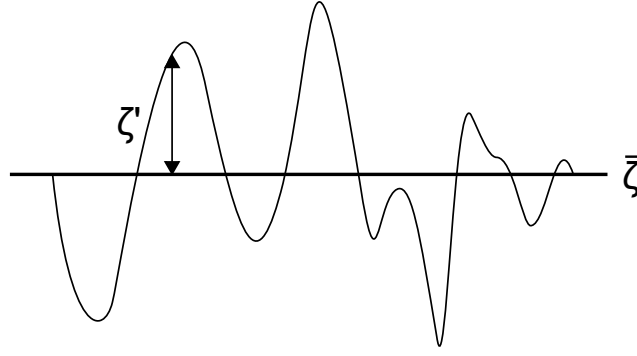


FIGURE 2.4 – Schéma d'illustration de la décomposition de Reynolds du scalaire ζ en un terme moyen $\bar{\zeta}$ et en un terme d'écart à la moyenne ζ' .

La décomposition de Reynolds implique certaines règles appelées postulats de Reynolds :

$$\bar{\zeta'} = 0$$

$$\overline{\zeta\xi} = \bar{\zeta} \bar{\xi} + \overline{\zeta'\xi'}$$

$$\overline{\bar{\zeta}\xi} = \bar{\zeta} \bar{\xi}$$

$$\overline{a\zeta} = a\bar{\zeta}, \text{ avec } a \text{ constante}$$

$$\overline{\zeta + \xi} = \bar{\zeta} + \bar{\xi}$$

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial s} \quad (2.20)$$

Ces relations sont valables lorsque les moyennes portent sur des ensembles suffisamment grands (i.e. un nombre suffisamment grand de réalisations dans des conditions identiques). Cependant ces conditions ne sont jamais totalement vérifiées dans les mesures atmosphériques et les moyennes sont calculées sur des séries temporelles de quantités statistiques en faisant l'hypothèse d'ergodicité (*Kaimal and Finnigan, 1994*). Pour que cette hypothèse soit applicable il faut que les fluctuations soient stationnaires statistiquement pendant la période moyennée.

2.3.4 La couche de surface

Quel que soit son état, la base de la CLA présente des caractéristiques similaires. En effet dans les premières dizaines de mètres au voisinage de la surface la direction du vent ne varie pas sur la verticale car les forces de gradient de pression et de Coriolis y sont négligeables devant les forces de frottement.

Cette couche est appelée couche de surface, on parle aussi de couche à flux constants puisque les variations des flux turbulents y sont inférieures à 10 %.

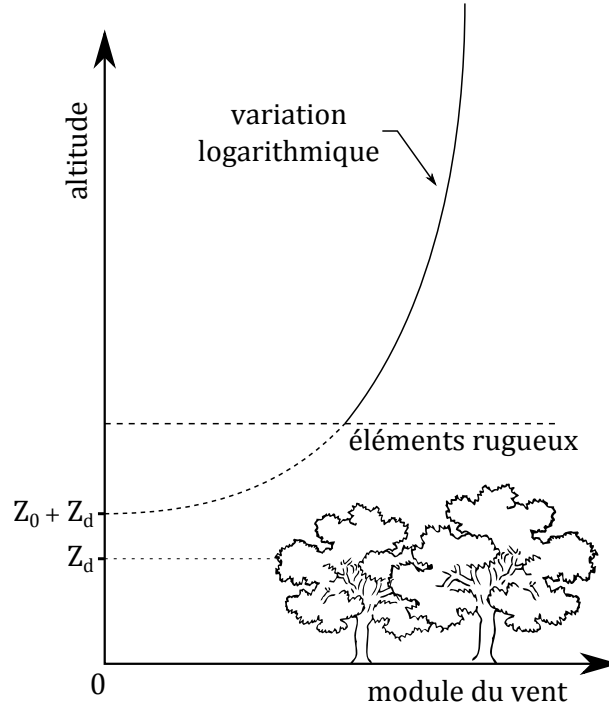


FIGURE 2.5 – Schéma dynamique de la couche de surface (De Moor, 1996).

La théorie de similitude développée par Monin et Obukhov (1954) montre que pour une couche de surface homogène et stationnaire, il existe des relations universelles entre les différentes échelles caractéristiques de la couche de surface en fonction de l'état de l'atmosphère.

Ainsi, 4 échelles fondamentales ont été définies.

- La vitesse de frottement u_* :

$$u_*^2 = \sqrt{(\overline{u'w'})_s^2 + (\overline{v'w'})_s^2} \quad (2.21)$$

Remarque : On peut aussi donner la vitesse de frottement en fonction du flux de quantité de mouvement (τ_s) à la surface :

$$u_*^2 = \sqrt{\frac{|\tau_s|}{\rho}}$$

- La longueur de Monin-Obukhov :

$$L_{MO} = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{\theta_v} (\overline{w'\theta'_v})_s} \quad (2.22)$$

avec k la constante de von Karman ($k = 0,4$).

- L'échelle caractéristique de température :

$$\theta_* = -\frac{(\overline{w'\theta'})_s}{u_*} \quad (2.23)$$

– L'échelle caractéristique de l'humidité :

$$q_* = - \frac{(\overline{w'q'})_s}{u_*} \quad (2.24)$$

L'humidité spécifique correspond au rapport entre la masse de vapeur d'eau et la masse d'air humide. Elle est notée ici q .

On introduit aussi un paramètre décrivant l'état de l'atmosphère, il s'agit de l'indice de stabilité noté ζ :

$$\zeta = \frac{z - z_d}{L_{MO}} = - \frac{(g/\theta_v)(\overline{w'\theta'_v})_s}{u_*^3/k(z - z_d)} \quad (2.25)$$

avec z_d la hauteur de déplacement qui correspond à une hauteur de sol fictive qui dépend de la structure des obstacles au sol (forêt, prairie).

Ce nombre sans dimension est couramment utilisé pour mesurer l'état de l'atmosphère. Il indique un état instable lorsque sa valeur est négative et un état stable lorsque sa valeur est positive.

L'application de la théorie de similitude à la couche de surface amène à la relation décrivant le profil de vent pour une couche de surface neutre :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (2.26)$$

avec z_0 la longueur de rugosité et z_d la longueur de déplacement.

Ce profil logarithmique (figure 2.5) du vent n'est plus valable près des éléments rugueux. La hauteur à laquelle le vent s'annule correspond à longueur de rugosité (z_0). La longueur de rugosité dépend principalement de la structure des obstacles. Elle est de l'ordre du mètre pour une forêt et de l'ordre du centimètre pour une prairie. D'autre part dans le cas où les obstacles sont grands (cas de la forêt) le profil logarithmique ne s'établit qu'au-dessus de ces obstacles, la longueur de déplacement (z_d) est alors définie de telle façon que le vent s'annule pour $z = z_0 + z_d$.

2.3.5 Les échanges à la surface

Un flux de masse à la surface est défini comme une quantité qui traverse une surface horizontale unitaire pendant une seconde. Mathématiquement le flux de masse d'un scalaire (F_x en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) s'écrit comme la covariance de la vitesse verticale (w en m s^{-1}) et de la concentration ou masse volumique du scalaire (ρ_x en kg m^{-3}) qui traverse orthogonalement la surface.

$$F_x = \overline{w\rho_x} \quad (2.27)$$

En appliquant la décomposition de Reynolds, le flux correspond à la somme du transport par le mouvement moyen et du transport par la turbulence :

$$F_x = \overline{w\rho_x} = \bar{w} \bar{\rho_x} + \overline{w'\rho'_x} \quad (2.28)$$

Il est très difficile de mesurer la vitesse verticale moyenne près de la surface car celle-ci est souvent très faible ($\bar{w} \sim 0,1 \text{ mm s}^{-1}$). Le terme de transport par le mouvement moyen n'est donc pas déterminé expérimentalement. Le terme de transport par la turbulence correspond à la corrélation des fluctuations de la vitesse verticale et de la concentration du scalaire. Seul ce terme de flux turbulent peut être mesuré expérimentalement.

Une méthode a été proposée par *Webb et al.* (1980) pour déterminer indirectement la vitesse moyenne \bar{w} due aux fluctuations de densité. D'autres facteurs liés à la topographie peuvent influencer \bar{w} mais ne sont pas considérés ici. En partant de l'équation de conservation de la masse et en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de sources ni de puits d'air sec à la surface de la terre on peut écrire :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (2.29)$$

pour un écoulement unidimensionnel stationnaire, on obtient :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{w}}{\partial z} = 0. \quad (2.30)$$

Ce qui signifie que $\bar{\rho} \bar{w}$ est constant et comme il n'y a ni source ni puits à la surface alors $\bar{\rho} \bar{w} = 0$.

Avec la décomposition de Reynolds et à partir de ce résultat, on obtient l'expression de la vitesse verticale moyenne ou vitesse de Webb :

$$\bar{\rho} \bar{w} = \bar{w} \bar{\rho} + \overline{w' \rho'} = 0 \text{ soit } \bar{w} = -\frac{\overline{w' \rho'}}{\bar{\rho}} \quad (2.31)$$

Si l'on remplace la vitesse verticale moyenne par son expression en fonction de la masse volumique de l'air dans la formule du flux de masse d'un scalaire, on a :

$$F_x = \bar{w} \bar{\rho}_x + \overline{w' \rho'_x} = -\frac{\overline{w' \rho'}}{\bar{\rho}} \bar{\rho}_x + \overline{w' \rho'_x} \quad (2.32)$$

Au lieu d'exprimer le flux du scalaire avec sa concentration ρ_x on peut utiliser le rapport de mélange χ . Pour rappel le rapport de mélange d'un scalaire est indépendant des changements de température et de pression et va donc se conserver. Il s'écrit $\chi_x = \frac{\rho_x}{\rho}$

et les fluctuations du rapport de mélange donnent $\chi'_x = \frac{\rho'_x}{\bar{\rho}} - \frac{\bar{\rho}_x}{\bar{\rho}} \frac{\rho'}{\bar{\rho}}$ au premier ordre. La covariance des fluctuations de la vitesse verticale et du rapport de mélange du scalaire s'écrit alors :

$$\overline{w' \chi'_x} = \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\overline{w' \rho'_x} - \frac{\bar{\rho}_x}{\bar{\rho}} \overline{w' \rho'} \right) = \frac{1}{\bar{\rho}} (\overline{w' \rho'_x} + \bar{w} \bar{\rho}). \quad (2.33)$$

Ceci nous permet d'obtenir directement le flux du scalaire en calculant la covariance des fluctuations de la vitesse verticale et du rapport de mélange, sans avoir besoin de calculer la vitesse verticale moyenne.

$$F_x = \bar{\rho} \overline{w' \chi'_x} \quad (2.34)$$

Dans ce cas il n'est pas nécessaire d'appliquer la correction tenant compte de la vitesse de Webb. Le rapport de mélange d'un constituant de l'atmosphère est plus souvent utilisé dans le calcul de flux pour cette raison.

Les flux de chaleur sensible (H), chaleur latente (LE) et de CO₂ sont définis par les relations suivantes :

$$H = \bar{\rho} C_p \overline{w'T'}, \quad (2.35)$$

avec C_p la capacité calorifique de l'air sec à pression constante ($C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

$$LE = \bar{\rho} L \overline{w'r'}, \quad (2.36)$$

avec $\bar{\rho}$ la densité de l'air sec moyenne, L la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($L = 2,45.10^6 \text{ J kg}^{-1}$, pour une température de 20°C) et r le rapport de mélange de vapeur d'eau (kg kg^{-1}). Les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont exprimés en W m^{-2} .

Le flux de CO₂ exprimé en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ s'écrit :

$$F_{CO_2} = \frac{\bar{\rho}}{M_a} \overline{w'\chi'_{CO_2}}, \quad (2.37)$$

avec χ_{CO_2} le rapport de mélange de CO₂ en ppm et M_a la masse molaire de l'air sec ($M_a = 28,96.10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$).

Les échanges d'énergie à la surface sont résumés par l'équation bilan suivante :

$$R_n = H + LE + G \quad (2.38)$$

Le rayonnement net (R_n) disponible à la surface est utilisé pour réchauffer l'atmosphère (flux de chaleur sensible), pour vaporiser l'eau (flux de chaleur latente) et pour réchauffer le sol (flux de conduction, G).

2.4 Les techniques de mesure de flux

Des quantités considérables d'énergie et de matière sont échangées à chaque instant entre la surface terrestre et l'atmosphère. Ces échanges ont un rôle important pour le climat, l'écologie, la santé des êtres vivants et conditionnent les propriétés de notre atmosphère.

La pollution liée aux activités humaines entraîne aussi des échanges considérables de polluants de la surface vers l'atmosphère (émissions) et dans un second temps de l'atmosphère vers la surface (dépôt). L'étude de ces échanges et leur quantification sont importants pour comprendre les phénomènes en jeu, estimer l'impact sur l'environnement et sur le climat ainsi que pour établir des paramétrisations fiables des processus atmosphériques.

La mesure des flux à la surface permet d'estimer les quantités échangées mais pose souvent des difficultés techniques car à l'échelle locale ces échanges sont faibles et mettent en jeu des concentrations de l'ordre du ppt au ppb (pour 1 milliard de molécules dans un volume d'air on rencontrera 1 molécule de l'espèce chimique étudiée). Malgré les rapides progrès techniques, les analyseurs d'espèces en trace restent encore difficiles à utiliser et représentent un investissement important (*Hewitt et al.*, 2011).

Dans cette section, nous allons présenter les techniques les plus répandues et adaptées à la mesure des flux de la végétation, chacune présentant des avantages et des limitations qui seront décrits ici. Les techniques utilisées dans mon travail de thèse seront explicitées plus en détail.

2.4.1 La méthode des chambres

La méthode la plus simple à mettre en place et qui a été utilisée en premier consiste à isoler dans une chambre ou une enceinte le sujet et suivre l'évolution de la concentration de l'espèce étudiée pour en déduire un flux. On peut de cette manière étudier les flux provenant de la surface, d'une plante ou branche, ou encore placer une chambre à la surface de l'eau. Elle nécessite un analyseur en ligne ou bien le prélèvement régulier d'échantillons d'air. Pour étudier les flux de COV provenant de la végétation on utilise généralement une enceinte en Teflon souple et transparent que l'on place autour d'une branche ou sur une plante de petite taille (Fig. 2.6) avec un débit d'air constant. On parle de chambres dynamiques en opposition aux chambres statiques où il n'y a pas d'échange avec l'extérieur.



FIGURE 2.6 – Photo d'une chambre en Teflon sur une branche de pommier d'ornement (*Malus sp.*) lors d'une étude sur les émissions de COV des fleurs (Baghi et al., 2012a).

De l'air préalablement purifié est constamment insufflé dans la chambre pour maintenir une légère surpression et empêcher les parois d'entrer en contact avec les feuilles. Le taux d'émission est obtenu par le calcul à l'état stationnaire de la différence entre la concentration de l'espèce étudiée dans l'air sortant de la chambre et dans l'air entrant multiplié par le débit et divisé par la masse sèche de végétation (feuilles, fleurs) emprisonnée :

$$ER = \frac{(C_{out} - C_{in})Q}{m_{dry}} \quad (2.39)$$

où le taux d'émission (ER) est exprimé en $\mu\text{g(C)} \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, les concentrations de l'air entrant et sortant respectivement C_{in} et C_{out} sont en $\mu\text{g(C)} \text{ l}^{-1}$, Q le débit d'air en l h^{-1} , et la masse sèche de végétation emprisonnée m_{dry} en g. Pour simplifier cette relation, on peut considérer $C_{in} \approx 0$ lorsque l'air entrant est filtré.

Au delà de sa simplicité, cette technique permet de travailler en laboratoire et de contrôler les paramètres environnementaux pour évaluer leurs effets sur les émissions. Elle facilite l'usage d'analyseurs dont le fonctionnement est optimal en laboratoire. D'un autre côté, ces mesures ne sont représentatives qu'à petite échelle et la question se pose de la pertinence d'une extrapolation des résultats à des échelles plus grandes (est-ce que la mesure sur une branche peut être utilisée pour estimer les émissions à l'échelle d'une

forêt?). Il faudra alors multiplier les mesures pour avoir une représentation statistique. Cette technique pose un second problème car elle modifie l'environnement du sujet. L'installation d'une enceinte autour de la branche induit un stress qui peut modifier la biologie de la plante. Ce phénomène est accentué lorsque la température augmente sous l'effet du rayonnement solaire à l'intérieur de l'enceinte et devient très supérieure à la température ambiante (*Dabberdt et al.*, 1993).

2.4.2 Les méthodes de micrométéorologie

Les méthodes de micrométéorologie sont apparues plus tard avec la démocratisation des capteurs de vent rapide (anémomètres soniques). Installé sur une tour, ce type d'instrumentation ne perturbe pas l'environnement de la source et permet de mesurer les échanges entre la surface ou la canopée et l'atmosphère. Les flux mesurés sont représentatifs de la surface au vent de la tour à condition que cette surface ou canopée soit homogène. L'extension de "l'empreinte du flux" dépend de la hauteur de mesure, de la vitesse de frottement et l'état de stabilité de l'atmosphère. Généralement les échelles spatiales couvertes par ces techniques sont comprises entre 100 m^2 et 1000 m^2 (figure 2.7), ce qui n'est pas comparable avec les échelles spatiales des chambres ($0,01 \text{ m}^2 - 10 \text{ m}^2$). Cette particularité rend les techniques micro-météorologiques idéales pour étudier les échanges d'un écosystème entier avec l'atmosphère et dans des conditions naturelles. De plus, une station de mesure peut être déployée sur une longue période et ainsi permettre l'étude d'effets à long terme (influences des saisons).

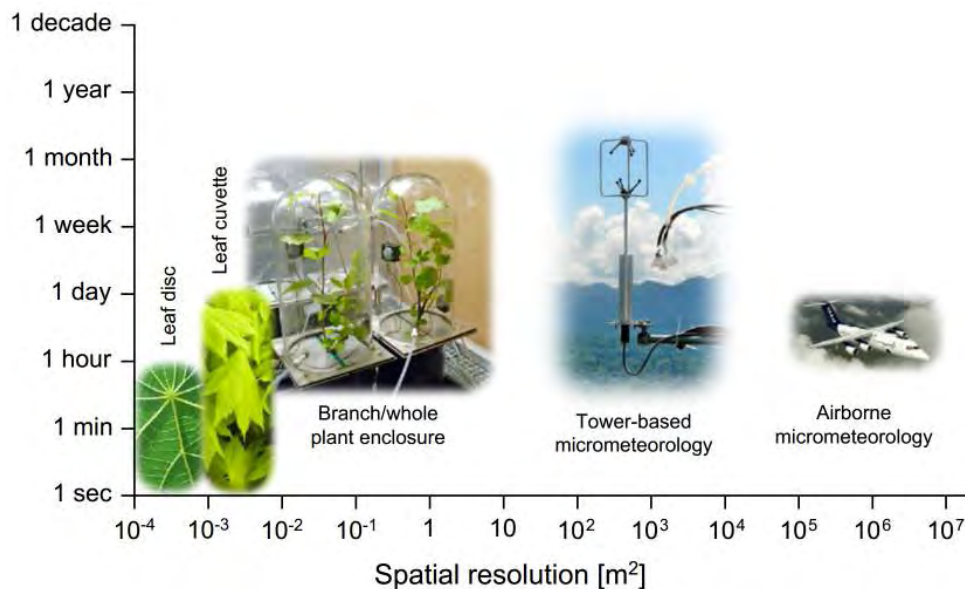


FIGURE 2.7 – Échelles spatiales et temporelles des différentes techniques de mesure de flux de COV (*Hewitt et al.*, 2011).

Parmi les techniques de mesure de flux par micro-météorologie, on distingue les techniques directes ou indirectes, selon qu'elles requièrent des paramétrisations ou non. La technique idéale pour une situation est déterminée par plusieurs critères dont le coût, la résolution spatiale et temporelle désirée, la précision, la disponibilité en ressources électriques, etc... La nature des espèces étudiées conditionne aussi le choix de la technique

car, selon leurs réactivités des transformations chimiques peuvent avoir lieu entre le niveau d'émission (canopée et intra-canopée) et le niveau du capteur quelques mètres plus haut.

2.4.3 La technique Eddy Covariance (EC)

Considérée comme une référence, la technique EC s'appuie directement sur les fluctuations des variables mesurées pour en déterminer le flux selon la relation vue à la section 2.3.5. Cette relation est rappelée ici, et peut aussi s'écrire sous la forme d'une intégrale sur la durée de mesure (T).

$$F_x = \bar{\rho} \overline{w' \chi'_x} = \bar{\rho} \frac{1}{T} \int_0^T w'(t) \chi'_x(t) dt \quad (2.40)$$

La période (T) sur laquelle est calculé le flux doit être suffisamment longue pour capturer un nombre important de tourbillons énergétiques et suffisamment courte pour pouvoir considérer les conditions stationnaires durant toute la période (*Foken and Wichura, 1996*). Une période de 30 min est généralement utilisée mais peut se limiter à 20 min lorsque les vents sont forts et s'étendre à 1 heure si les vent sont très faibles. Lorsque la turbulence est très peu développée (écart-type sur la vitesse verticale σ_w faible), il est préférable d'utiliser une période relativement longue pour réduire l'erreur aléatoire sur la variance. La forme de l'intégrale en fonction du temps est un bon indicateur de la stationnarité de la période de mesure. Si cette forme est linéaire, alors l'échantillon est stationnaire et indépendant du temps, si elle n'est pas linéaire et présente des ressauts importants alors l'échantillon n'est pas stationnaire.

Dans la couche de surface, les tourbillons de petite taille contribuent de façon significative au flux turbulent. Pour bien prendre en compte l'ensemble des phénomènes turbulents, la mesure des variables doit être effectuée à des échelles de temps très courtes. L'énergie transportée par les tourbillons correspondants à une échelle temporelle de quelques dixièmes de seconde n'est pas négligeable ce qui implique que la fréquence des mesures doit être supérieure ou égale à 10 Hz pour ne pas perdre une partie de l'information.

Cette contrainte est forte car il y a peu d'espèces chimiques pour lesquelles il existe des analyseurs avec des temps de réponse aussi courts. Pour les COV, deux analyseurs possèdent des temps de réponse proche de 0,1 s, le Fast Isoprene Sensor (FIS) de Hills Scientific (*Guenther and Hills, 1998*) pour la mesure de l'isoprène et les spectromètres de masse de type PTR-MS (*Blake et al., 2011*) et PTR-TOF-MS (*Müller et al., 2010*) pour la mesure de plusieurs composés selon leur masse. La sensibilité de ce type d'instrument dépend de la durée d'intégration de la mesure et donc du temps de réponse. En réalité, leur sensibilité est souvent insuffisante pour les espèces en trace comme les COV lorsque les temps de réponse sont aussi courts. L'augmentation du temps de réponse permet cependant d'améliorer la sensibilité mais l'EC n'est plus applicable, d'autres méthodes sont alors utilisées.

Pour mettre en œuvre la technique EC, le dispositif expérimental doit être composé d'un anémomètre sonique pour la mesure rapide des trois composantes du vent et d'un analyseur rapide de l'espèce étudiée.

L'installation de l'anémomètre est souvent délicate car il est important que l'axe vertical du capteur soit orienté sur la vraie direction verticale. En pratique, cet alignement

parfait est impossible et l'on a recours à une rotation des mesures de vent dans le système de coordonnées de référence (*Wilczak et al.*, 2001) en post-traitement.

Il existe deux types d'analyseurs, les analyseurs à cellule de mesure ouverte ou bien à cellule fermée. Dans le premier cas la cellule doit être placée proche du point de mesure de l'anémomètre, idéalement la mesure du vent et du rapport de mélange de l'espèce doivent être co-localisées. Dans le second cas, pour les systèmes fermés, un tube de prélèvement sert à l'acheminement de l'échantillon d'air vers l'analyseur. La prise d'air doit être placée au plus proche de la mesure de vent. Dans les deux cas il peut être nécessaire de compenser la distance séparant les deux capteurs par une resynchronisation temporelle des mesures. De plus, le fait de séparer les capteurs d'une certaine distance entraîne une diminution de la corrélation entre les mesures (*Moore*, 1986). Lors de l'utilisation d'un système fermé, il est important de réduire au minimum la longueur du tube de prélèvement pour limiter les effets d'atténuation des fluctuations de concentration et limiter le temps de transit de l'échantillon (*Lenschow and Raupach*, 1991). Des corrections supplémentaires sont toutefois utilisées pour compenser ces différents effets (*Moore*, 1986). La figure 2.8 illustre le premier cas avec un anémomètre sonique (CSAT-3, Campbell Scientific) et un analyseur de CO_2 et vapeur d'eau à cellule ouverte (LI-7500, LI-COR) installés sur un mât au-dessus d'une forêt. En plus, une centrale d'acquisition ou un ordinateur est nécessaire pour enregistrer les mesures et stocker les données. Le calcul des flux est effectué en post-traitement.



FIGURE 2.8 – Exemple de dispositif expérimental pour la technique EC comprenant un anémomètre sonique, un analyseur de CO_2 et H_2O (rouge pâle) et plusieurs tubes de prélèvements.

Cette technique offre la possibilité d'appliquer des traitements post-mesure sur les données brutes et ainsi d'améliorer les données finales en appliquant le traitement le plus adapté au jeu de données.

La technique EC a été utilisée dans ce travail de thèse pour la mesure des flux de chaleur sensible, de chaleur latente et de CO_2 lors des campagnes de mesures et a servi de référence pour valider la mesure des flux par DEC avec le système de prélèvement développé.

2.4.4 La technique Relaxed Eddy Accumulation (REA)

En l'absence d'analyseurs rapides d'autres techniques peuvent être utilisées, comme la REA, faisant intervenir des paramétrisations.

La technique "Relaxed Eddy Accumulation" (REA) est souvent utilisée pour la mesure de flux de COV au-dessus de la canopée. Cette technique indirecte provient de la technique directe "Eddy Accumulation" (EA) proposée par *Desjardins* (1977) et qui consiste à séparer l'air de l'échantillon dans deux réservoirs selon que cet air est advecté depuis la surface vers l'atmosphère ($w > 0$) ou bien de l'atmosphère vers la surface ($w < 0$). Avec la technique directe EA l'air doit être échantillonné de manière à ce que le débit de pompage soit proportionnel au vent vertical, ce qui est techniquement difficile à réaliser. Pour la REA, le débit d'échantillonnage est constant et un coefficient empirique β est introduit en compensation de cette perte d'information sur le vent vertical (*Businger and Oncley*, 1990). Généralement pour les COV, les échantillons sont piégés sur des cartouches d'adsorbants puis analysés "off-line" par chromatographie en phase gazeuse (GC-MS). Le flux est alors calculé en utilisant la différence de concentrations entre les deux réservoirs, l'écart-type de la vitesse verticale sur la période de mesure et le coefficient empirique β . La possibilité d'effectuer l'analyse des échantillons a posteriori dans un laboratoire qu'offre cette technique est avantageuse lorsque l'installation d'une instrumentation d'analyse lourde n'est pas possible sur le site de mesure. Cependant le stockage des échantillons ne convient pas pour les espèces réactives qui peuvent réagir ou être détruites lors d'un contact avec les surfaces.

2.4.5 La technique des gradients

La technique des gradients est une autre méthode indirecte qui repose sur la théorie de similitude dans la couche de surface (*Dyer*, 1974). Sa mise en œuvre nécessite de déterminer la stabilité de la couche et de mesurer le rapport de mélange de l'espèce étudiée à plusieurs niveaux au-dessus de la canopée. Le flux est calculé à partir du gradient de concentration entre les différentes hauteurs de mesure et du coefficient de diffusivité. Ce coefficient est déterminé par la hauteur de mesure, la vitesse du vent, la stabilité de la couche et la rugosité de la surface. Cette technique est utile lorsque les analyseurs sont trop lents pour être utilisés en EC, mais présente des désavantages. La mesure de concentrations à plusieurs niveaux peut nécessiter une duplication de l'instrumentation et ainsi augmenter le coût et la consommation en énergie. D'autre part, l'empreinte spatiale des mesures est différente pour chaque hauteur avec comme conséquence d'introduire des erreurs si la surface n'est pas totalement homogène. Une grande précision est aussi requise sur la mesure des concentrations pour déterminer de manière fiable les gradients. Enfin cette technique ne convient pas aux espèces réactives dont le gradient de concentration est modifié par les transformations chimiques entre deux niveaux de mesure (*Kristensen et al.*, 2009).

2.4.6 La technique Disjunct Eddy Covariance (DEC)

La technique "Disjunct Eddy Covariance" (DEC) a été proposée relativement récemment comme une alternative à la technique EC pour permettre l'utilisation d'analyseurs relativement lents (*Rinne et al.*, 2001).

La DEC est une méthode directe mais se différencie de l'EC par un nombre réduit de valeurs pour calculer un flux. La mesure continue de la concentration ou du rapport de mélange est remplacée par une capture régulière d'échantillons espacés dans le temps de quelques secondes. Le temps entre chaque capture est dédié à l'analyse. Il est choisi en

fonction de l'analyseur. La contrainte sur la rapidité de la mesure est moins forte qu'avec l'EC ce qui permet d'estimer les flux d'un plus grand nombre d'espèces chimiques. Cette méthode garde l'avantage de ne pas avoir recours à des paramétrisations empiriques.

Théorie de la DEC

Pour estimer le flux d'une espèce à la surface avec la méthode EC, la covariance $\overline{w'\chi'_x}$ des fluctuations de vitesse verticale et du rapport de mélange est calculée typiquement sur une période de 30 min. Les valeurs de $w'\chi'_x$ sont mesurées avec une fréquence de mesure de l'ordre de 10 Hz et il en résulte un nombre N de 18000 valeurs.

$$F_x = \bar{\rho} \overline{w'\chi'_x} = \bar{\rho} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (w'\chi'_x)_j \quad (2.41)$$

Le concept de la DEC s'appuie sur l'idée que le flux peut être estimé par un nombre réduit de valeurs prises aléatoirement pendant la période de mesure. Étant donné que la turbulence n'est pas périodique, la mesure d'échantillon à intervalles réguliers peut se rapporter à un processus aléatoire. Les échantillons sont prélevés à intervalles Δt constants avec $1 \text{ s} \leq \Delta t \leq 30 \text{ s}$; de cette façon un nombre de valeurs (n), compris entre 70 et 1800, est obtenu sur une période caractéristique d'une demi-heure. Ainsi l'intervalle de temps entre deux mesures est utilisé pour analyser l'échantillon prélevé.

La méthode DEC a été validée par comparaison à la méthode EC conventionnelle à travers des campagnes de mesures expérimentales et des simulations (*Lenschow et al.*, 1994; *Rinne et al.*, 2000, 2008; *Bosveld and Beljaars*, 2001; *Ammann et al.*, 2006; *Turnipseed et al.*, 2009; *Baghi et al.*, 2012b). Les résultats de ces travaux confirment l'hypothèse qu'un nombre réduit de valeurs n'entraîne pas d'erreurs systématiques mais uniquement une augmentation de l'incertitude sur l'estimation du flux.

Selon le type d'analyseur utilisé, et surtout selon le temps de réponse de l'analyseur, il y a deux façons de mettre en œuvre la DEC.

L'analyseur PTR-MS (*Blake et al.*, 2011) est un spectromètre de masse à réaction de transfert de proton dont le principe d'analyse implique une protonisation de l'échantillon puis la focalisation des ions créés sur un détecteur selon leur masse. Cet instrument n'est capable d'analyser qu'une seule masse à la fois. La détection de composés de masses différentes est donc séquentielle. La méthode DEC convient parfaitement à ce type d'instrument dont le temps de réponse est court ($\leq 1 \text{ s}$) mais dont la mesure est séquentielle. L'échantillon d'air est dans ce cas prélevé de manière continue. Le PTR-MS de type quadripolaire possède un temps de réponse rapide mais analyse chaque masse de manière séquentielle.

Lorsque le temps de réponse de l'analyseur est plus long (généralement $\geq 1 \text{ s}$) il est nécessaire de mettre en place un dispositif de capture rapide des échantillons, l'intervalle de temps entre deux captures étant dédié à l'analyse de l'échantillon capturé. Cette solution présente généralement un réservoir intermédiaire dans lequel l'échantillon est stocké après sa capture pour être ensuite acheminé vers un analyseur en ligne. Une pompe à vide permet de vider le réservoir intermédiaire et l'ouverture rapide d'une électrovanne déclenche la capture d'un nouvel échantillon par le remplissage du réservoir.

Le temps de capture de l'échantillon par ce dispositif est un paramètre très important. Pour les mêmes raisons que pour la technique EC, il doit être minimisé le plus possible pour se rapprocher du dixième de seconde (0,1 s). En effet, un temps de capture plus long

entraînera des pertes dans les hautes fréquences et donc une sous-estimation systématique du flux. L'électrovanne utilisée pour la capture doit répondre à des critères spécifiques dont un déclenchement rapide ($\simeq 20$ ms) et un diamètre d'ouverture suffisamment grand pour ne pas contraindre le débit de remplissage. Les tubes de prélèvement sont aussi une source de ralentissement pour la capture de l'échantillon. Ils doivent être d'un diamètre grand et d'une longueur suffisamment courte pour ne pas causer une perte de charge trop importante sur le débit.

Dans ce type de système de prélèvement, une contamination de l'échantillon peut intervenir dans le cas où le réservoir intermédiaire comporte des résidus de l'échantillon précédent. Ce phénomène a pour conséquence de minimiser la variance des concentrations et entraîne une sous-estimation des flux. Une correction simple de ce phénomène a été proposée par *Langford et al.* (2009) :

$$\chi_{x,corr} = \frac{\chi_x P_r - \chi_{x,pre} P_v}{P_r - P_v} \quad (2.42)$$

avec $\chi_{x,corr}$ le rapport de mélange corrigé, χ_x le rapport de mélange de l'échantillon actuel, $\chi_{x,pre}$ le rapport de mélange de l'échantillon précédent, P_r la pression du réservoir rempli et P_v la pression du réservoir sous vide.

L'utilisation d'une pompe à vide performante pour atteindre un vide de qualité dans le réservoir minimise toutefois ce problème.

L'incertitude sur le flux liée à la méthode DEC

Plusieurs études ont permis de caractériser l'incertitude résultant de l'échantillonnage disjoint par rapport à l'EC. Dans la figure 2.9 il est montré que l'incertitude sur l'estimation du flux avec la méthode DEC augmente lorsque le nombre de valeurs (n) utilisées pour le calcul du flux diminue. D'après la figure 2.9 le coefficient de détermination (r^2) entre les flux mesurés par EC et les flux mesurés par DEC est supérieur à 94 % pour 60 valeurs et supérieur à 99 % pour 120 valeurs.

Lenschow et al. (1994) ont formulé l'incertitude aléatoire sur le flux mesuré par la méthode DEC comme suit :

$$\frac{\sigma_F^2}{\sigma_{w'\chi'_x}^2} \frac{T}{\tau_f} = \frac{\Delta t}{\tau_f} \coth \left(\frac{\Delta t}{2\tau_f} \right) \quad (2.43)$$

avec σ_F^2 la variance sur le flux, $\sigma_{w'\chi'_x}^2$ la variance du produit des séries temporelles $w'\chi'_x$, T la période de calcul du flux et τ_f l'échelle de temps intégrale de la série temporelle $w'\chi'_x$. Dans le cas où Δt est nettement inférieur à l'échelle de temps intégrale, l'équation 2.43 peut être simplifiée comme suit :

$$\frac{\sigma_F^2}{\sigma_{w'\chi'_x}^2} = 2 \frac{\tau_f}{T} \quad (2.44)$$

L'erreur est dans ce cas comme pour l'EC, proportionnelle au rapport entre l'échelle de temps intégrale et la période utilisée pour le calcul du flux.

Dans le cas où l'intervalle d'échantillonnage est significativement supérieur à l'échelle de temps intégrale, l'équation 2.43 donne :

$$\frac{\sigma_F^2}{\sigma_{w'\chi'_x}^2} = \frac{\Delta t}{T} \quad (2.45)$$

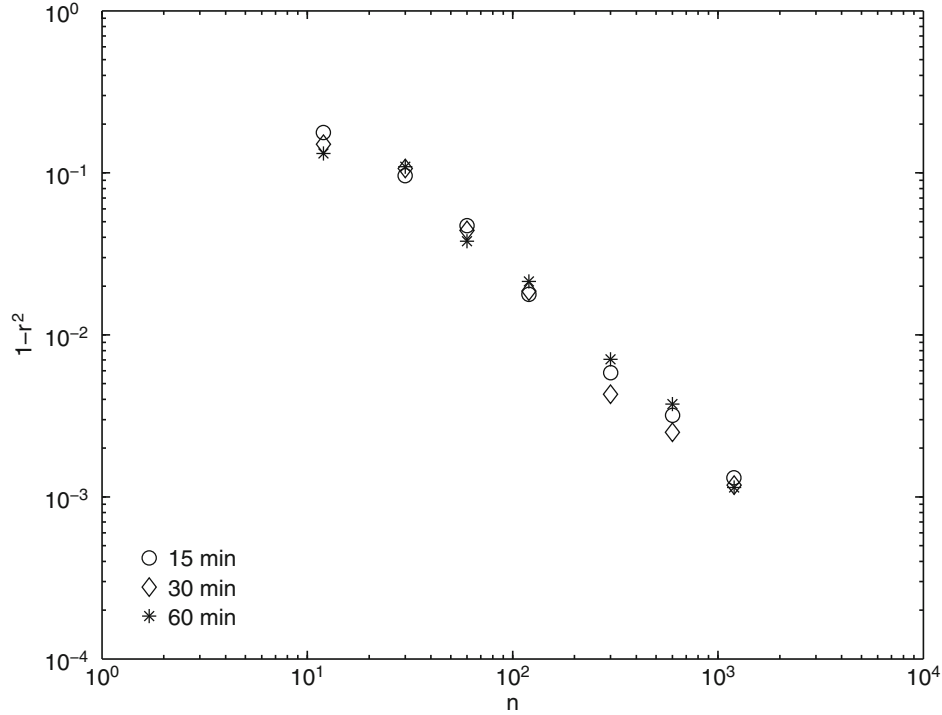


FIGURE 2.9 – Corrélation (ici représenté en $1 - r^2$) entre les flux de chaleur sensible H calculés par EC et DEC en fonction du nombre d'échantillons et pour différentes périodes de mesures (Rinne and Ammann, 2012; Warneke et al., 2002).

En considérant que le rapport $\frac{\Delta t}{T}$ est égal à $\frac{1}{n}$, on retrouve le résultat obtenu pour une série statistiquement indépendante :

$$\sigma_F^2 = \frac{\sigma_{w'x'_x}^2}{n}, \text{ ou encore : } \sigma_F = \frac{\sigma_{w'x'_x}}{\sqrt{n}} \quad (2.46)$$

L'incertitude sur le flux σ_F dépend donc uniquement du nombre d'échantillons mesurés. Il est alors possible d'augmenter la période de mesure pour avoir un nombre plus grand d'échantillons et ainsi réduire l'incertitude. Cependant, en rallongeant la période de mesure la condition de stationnarité a moins de chance d'être réalisée. La période de 30 minutes généralement utilisée peut être étendue à une heure dans la plupart des cas.

L'échelle intégrale est un paramètre qui ne peut pas être obtenu à partir de mesures discontinues. Il peut être estimé en faisant l'hypothèse de similitude avec un autre paramètre dont on possède une série complète (ex : CO_2 ou H_2O). Typiquement, l'échelle de temps intégrale du produit des fluctuations de la vitesse verticale et de la concentration d'une espèce chimique dans la couche de surface est plus grande que l'échelle de temps intégrale du vent vertical. Les estimations d'échelles de temps intégrales dans la couche de surface sont rares dans la littérature. Lohou et al. (2010) donnent une estimation de l'échelle intégrale pour le produit $w'q'$ de 4-5 m (± 3 m) dans la couche de surface au-dessus d'une savane humide en Afrique de l'ouest. D'après ce résultat, on peut estimer que l'échelle de temps intégrale est inférieure ou égale à 10 s pour un vent moyen supérieur à $0,5 \text{ m s}^{-1}$, ce qui est le cas la plupart du temps. Pour un intervalle de capture Δt supérieur à 10 s alors l'incertitude sur le flux obéit à la relation 2.46 et ne dépend que du nombre

de valeurs.

2.5 Conclusion

Les méthodes de mesure de flux par micrométéorologie sont des solutions adaptées à la quantification des échanges d'énergie et de matière entre la surface terrestre et l'atmosphère à l'échelle d'un écosystème. Elles sont basées sur les propriétés de la couche limite atmosphérique où le transport vertical est dominé par la turbulence.

La technique Eddy Covariance (EC) est la technique de référence pour la mesure des émissions à la surface et consiste à calculer le flux à partir de la covariance des fluctuations de vitesse verticale et du rapport de mélange de l'espèce étudiée sur une période de plusieurs dizaines de minutes. L'application de cette technique est limitée car elle nécessite une mesure rapide (0,1 s) des paramètres vent et rapport de mélange. En effet peu d'analyseurs de gaz en traces possèdent un temps de réponse assez court et une sensibilité suffisante.

La technique Disjunct Eddy Covariance est une adaptation de l'EC qui a été introduite pour permettre l'utilisation d'analyseurs relativement lents. Comme pour l'EC le flux est calculé à partir de la covariance des fluctuations de vitesse verticale et du rapport de mélange mais sur un nombre réduit de valeurs. Un intervalle de temps de quelques secondes dédié à l'analyse sépare chaque prélèvement. Les échantillons doivent cependant être prélevés de manière rapide pour décrire toutes les échelles de la turbulence, ce qui implique l'utilisation d'un système de prélèvement adapté pour mettre en œuvre la technique DEC.

Le développement du système de prélèvement décrit dans le chapitre 4 est basé sur l'utilisation de la technique DEC.

Chapitre 3

Les composés organiques volatils

3.1 Introduction

Un composé chimique est qualifié d'organique lorsqu'il possède un atome de carbone lié à un ou plusieurs atomes d'hydrogène et d'oxygène ou d'autres éléments (N, F, Cl, Br, I, S, P, etc. . .) qui font partie de la constitution des êtres vivants. Le terme "composé organique volatil" (COV) regroupe l'ensemble des composés organiques dont la pression de vapeur est telle que l'on est susceptible de les rencontrer à l'état gazeux dans notre atmosphère, c'est à dire plusieurs milliers de molécules différentes. Les COV sont présents à l'état de traces dans l'atmosphère, c'est à dire dans des gammes de concentration allant du ppt à la dizaine de ppb voire plus près des sources d'émission. Le dioxyde de carbone (CO_2) et le monoxyde de carbone (CO) ne sont pas considérés comme des COV étant donné leur relative abondance dans l'atmosphère. Le méthane est aussi généralement exclu des COV pour les mêmes raisons. Le terme COV non méthaniques (COVNM) devrait alors être utilisé mais pour simplifier nous emploierons uniquement le terme COV.

Une fois libérés dans l'air, les COV subissent des transformations chimiques ou photo-chimiques. Le temps de vie des COV dans l'air est de l'ordre de la minute à plusieurs heures. Du fait de leur forte réactivité les COV jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère. En effet, ils modifient les propriétés oxydantes de l'atmosphère et participent à la formation de polluants secondaires comme l'ozone et les particules fines (aérosols organiques secondaires) qui constituent des préoccupations majeures à l'heure actuelle pour la qualité de l'air.

On distingue deux grandes catégories de sources de COV dans l'atmosphère : les sources anthropiques, liées aux activités humaines et les sources naturelles, dites biogéniques. À l'échelle mondiale les émissions naturelles représentent $1,2 \times 10^{15}$ gC par an (*Guenther et al.*, 1995) tandis que les émissions d'origine anthropiques sont estimées à $1,0 \times 10^{14}$ g(C) par an (*Singh and Zimmerman*, 1992). Ces estimations ont de grandes incertitudes mais soulignent l'importance des émissions naturelles qui dépassent d'un ordre de grandeur les sources anthropiques à l'échelle du globe.

Les activités humaines émettrices de COV sont nombreuses. Parmi les plus importantes on retient la combustion, et notamment la combustion d'énergies fossiles qui intervient principalement au niveau des transports, du chauffage et de l'industrie. Ensuite vient l'utilisation de solvants (application de peintures, revêtements, dégraissants, décapants...), qui rejettent de grandes quantités de COV par évaporation. L'industrie pétrolière est une source non négligeable lors du transport et raffinage des hydrocarbures. On peut encore

citer l'industrie chimique et l'industrie alimentaire qui génèrent des COV lors de procédés de synthèse, de distillation ou encore lors de la fabrication de boissons alcoolisées, l'extraction d'huiles et la préparation de plats cuisinés (*CITEPA*, 2007). La nature de ces émissions diffère d'une activité à l'autre. Plusieurs milliers de molécules différentes ont pu être identifiées mais seulement un nombre réduit d'espèces sont présentes en relative abondance. Les espèces caractéristiques des émissions anthropiques sont les composés aromatiques tels que le benzène (C_6H_6), le toluène (C_7H_8), le xylène (C_6H_4), l'éthylbenzène (C_8H_{10}), certains alcanes comme l'éthane (C_2H_6), le propane (C_3H_8), le butane (C_4H_{10}), ou encore le formaldéhyde (CH_2O). Les effets sur la santé de ces composés sont peu documentés à l'exception de quelques espèces (*Anderson et al.*, 2007). Les COV sont inhalés puis absorbés pour se retrouver dans le sang et devenir toxiques pour les tissus sur lesquels ils se fixent.

Les sources naturelles de COV dans l'atmosphère sont les sols, les sédiments, les océans, les animaux, et la végétation. Cette dernière est la source la plus importante et représente à elle seule 98% des émissions naturelles, estimée à l'échelle du globe à 1150 TgC par an. En second, on trouve les océans avec une estimation de 15-25 TgC par an (*Kettle and Andreae*, 2000; *Simó and Dachs*, 2002). Les autres sources étant négligeables, peu d'études leur sont consacrées et de grandes incertitudes existent sur leur estimations. D'après certaines études récentes il semblerait que la litière des sols soit une source de COV largement sous estimée (*Isidorov et al.*, 2003). Tandis que les émissions de COV par les océans peuvent se résumer à la production de diméthylsulfure (DMS) par le phyto-plancton, les émissions par la végétation relèvent de plusieurs processus de fabrication et impliquent des milliers de composés différents. La nature et la quantité des émissions diffèrent d'une espèce végétale à une autre et évoluent en réponse à de nombreux paramètres environnementaux. L'ensoleillement, la température, le stress hydrique, le stress induit par des blessures ou encore l'âge de développement des feuilles sont des facteurs qui peuvent multiplier les émissions et changer leur nature.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la végétation en tant que source majeure de COV pour l'atmosphère. Les points qui seront abordés sont les suivants : d'abord nous présenterons les espèces majeures émises dans l'atmosphère, puis comment ces molécules sont synthétisées dans la plante (biosynthèse), les facteurs environnementaux qui contrôlent les émissions, la modélisation de ces émissions et le devenir de ces COV dans l'atmosphère avec les principales espèces oxydantes de l'atmosphère.

3.2 Les émissions de COV biogéniques

3.2.1 Principaux COV émis par la végétation

Les plantes produisent des centaines de milliers de composés organiques qui vont être essentiels ou non à leur développement. Parmi ces composés une petite fraction, les composés les plus volatils, sont libérés dans l'air. Les composés émis forment un ensemble très hétérogène comprenant de nombreux groupes chimiques (alcanes, aclènes, aldéhydes, cétones, éthers, alcools...) avec des structures linéaires ou bien cycliques. Les composés que l'on retrouve le plus communément dans les émissions par les plantes sont les terpènes ou terpénoïdes. Le terme terpénoïde regroupe les terpènes oxygénés et les terpènes non-oxygénés. Les composés de cette famille sont appelés hémiterpène (C5), monoterpène (C10), ou sesquiterpène (C15) selon leur nombre d'atomes de carbone. Au delà de

15 atomes de carbone les terpènes ne sont généralement plus considérés comme volatils. La figure 3.1 présente quelques exemples de chaque groupe. L'hémiterpène isoprène (2-méthyl-1,3-butadiène) est le composé le plus répandu et représente à lui seul plus de la moitié des émissions de COV biogéniques à l'échelle du globe (*Guenther et al.*, 1995). Parmi les monoterpènes les plus communs, on trouve les composés tels que α -pinène, β -pinène, camphène, limonène, myrcène, 3-carène. Auxquels s'ajoutent quelques monoterpènes oxygénés comme par exemple le linalool ou encore l' α -terpinéol. Outre la grande famille des terpènes, on rencontre aussi fréquemment l'acétaldéhyde, le 2-méthyl-3-buten-2-ol (MBO) et d'autres composés dérivés de l'hexanal; puis des composés moins réactifs comme le méthanol, l'éthanol, l'acide formique, l'acide acétique, et l'acétone.

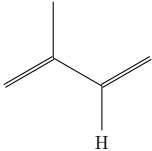
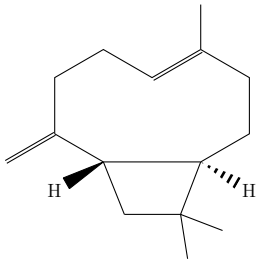
C5	isoprène	
C10	α -pinène	linalool
C15	Caryophyllène	

FIGURE 3.1 – Exemples de terpénoïdes.

3.2.2 Les mécanismes de synthèse des COV dans les végétaux

L'isoprène et les monoterpènes résultent d'un même précurseur, le diméthylallyl-diphosphate (DMAPP) et son isomère l'isopenthyl diphosphate (IPP). Il est à noter que le DMAPP et l'IPP sont aussi les précurseurs de composés tels que les caroténoïdes qui sont essentiels pour le développement de la plante (*Sharkey et al.*, 1991).

C'est par le cycle de l'acide mévalonique (MVA) que vont être formés ces précurseurs dans le cytoplasme et par le cycle du méthylerythritol (MEP) dans les plastides. La synthèse de l'isoprène fait intervenir une enzyme appelée isoprène-synthase. Située dans le

chloroplaste cette enzyme catalyse l'élimination du pyrophosphate du DMAPP et son activation est dépendante de la lumière (*Silver and Fall, 1991*).

Bien que le mécanisme de formation du 2-méthyl-3-buten-2-ol (MBO) reste inconnu, sa formation est supposée avoir lieu aussi dans le chloroplaste à cause de la dépendance de ses émissions à la lumière.

La combinaison par condensation du DMAPP et de l'IPP forme le monoterpène geranylpyrophosphate (GPP) qui est le précurseur d'autres monoterpènes mais aussi des sesquiterpènes s'il se combine avec une autre molécule d'IPP. La plupart des monoterpènes possèdent une structure cyclique et l'on appelle monoterpènes cyclases les enzymes qui catalysent leur formation à partir du GPP (*McGarvey and Croteau, 1995*). Ces enzymes ont la capacité de produire plusieurs monoterpènes différents. Par exemple, l'action de l'enzyme limonène synthase sur le GPP peut donner du limonène, de l' α -pinène, du β -pinène, ou du myrcène (*Rajaonarivony et al., 1992*). À noter que les monoterpènes ainsi formés peuvent subir une oxygénation pour donner des monoterpènes oxygénés (*Croteau and Gershenzon, 1994*). La formation des monoterpènes a généralement lieu dans les plastes non photosynthétiques (donc autres que les chloroplastes) tandis que les sesquiterpènes sont produits dans les cytoplasmes (*Carde et al., 1980; Gleizes et al., 1983; Kleinig, 1989; Soler et al., 1992; McCaskill and Croteau, 1995*).

Une fois produits, les monoterpènes peuvent être stockés dans des réservoirs spécialisés tels que les poils glandulaires chez la menthe, les canaux de résine dans les aiguilles de pins, les vésicules résinifères chez les sapins ou encore les glandes à huile dans les feuilles d'eucalyptus (*Lerdau et al., 1997*). Cependant certaines espèces de chênes (*Quercus*, lignée *Sclerophyllodris*) en région méditerranéenne, sont dépourvues d'isoprène et émettent des monoterpènes en fonction de la lumière ce qui laisse à penser que leur formation a lieu directement dans les chloroplastes et qu'il n'y a pas de stockage (*Loreto et al., 1996a*).

3.2.3 Rôles écophysologiques de la production et de l'émission des COV

Pour les plantes, les COV jouent essentiellement un rôle de défense, de protection et de communication. La composition des émissions est souvent complexe et la fonction de chaque composé n'est souvent pas connue. Le rôle de l'isoprène n'est toujours pas clairement démontré mais il semblerait qu'il soit une protection contre des températures élevées. En effet, *Singsaas et al. (1997)* ont montré que la fumigation d'isoprène permettait à certaines plantes émettrices d'isoprène de supporter des températures plus élevées et d'éviter une altération des fonctions photosynthétiques.

Les rôles des monoterpènes et sesquiterpènes sont nombreux et spécifiques pour certains composés. Ils peuvent agir comme une défense directe ou indirecte contre un herbivore ou un pathogène (*Gershenzon and Croteau, 1991*). Un exemple particulièrement marquant est celui des feuilles de maïs qui n'émettent habituellement pas de terpènes, et qui activent leur production lorsque la plante est consommée par une chenille. La production de COV est déclenchée ici par la présence d'un éliciteur (molécule qui déclenche les mécanismes de défense de la plante et donc la production de substances défensives) dans la salive des chenilles. Les émissions ainsi induites permettent à une guêpe parasitoïde qui utilise la chenille comme hôte pour sa larve, de repérer les plants attaqués. De cette manière les plants de maïs limitent les dégâts dus à une invasion de chenilles (*Turlings et al., 1990*).

Les monoterpènes contenus dans la résine des conifères présentent des propriétés anti-

microbiennes qui empêchent la colonisation de l'arbre par des pathogènes (*Cheniclet*, 1987; *Lewinsohn et al.*, 1991; *Himejima et al.*, 1992; *Funk et al.*, 1994).

Les monoterpènes possèdent aussi des fonctions allélopathiques, permettant à la plante d'avoir un effet sur une autre. *Fischer* (1991) et *Tarayre et al.* (1995) ont montré que ces émissions peuvent limiter la germination de graines ou le développement d'autres espèces à proximité de la plante. Un autre exemple illustre la communication inter-espèce chez les plants de tabac qui relâchent du salicylate de méthyle lors d'une infection par le virus de la mosaïque du tabac (TMV, "tobacco mozaic virus") pour signaler et activer chez les plants voisins des mécanismes de défense (*Shulaev et al.*, 1997).

Certains monoterpènes agissent comme des répulsifs aux herbivores mammifères se nourrissant sur la plante (*Farentinos et al.*, 1981; *Bell and Harestad*, 1987; *Elliott and Loudon*, 1987). D'autres présentent une toxicité moyenne à laquelle se sont adaptés les insectes (*Rhoades*, 1985). Ils servent aussi à attirer les pollinisateurs : par exemple le linalool, un monoterpène oxygéné, permet d'attirer les abeilles, mais le mélange de plusieurs composés reste en général plus efficace (*Dobson*, 1994).

3.2.4 Processus d'émissions au niveau de la plante

Les COV sont produits à l'intérieur des cellules des végétaux et nous allons voir dans cette section comment les COV transitent de la plante vers l'atmosphère. *Tingey et al.* (1991); *Monson et al.* (1995) et *Lerdau et al.* (1997) ont étudié les différentes voies possibles. Il en existe quatre :

- La diffusion à travers la cuticule, la cuticule étant l'enveloppe qui recouvre la partie aérienne des végétaux.
- La libération à travers les stomates qui va dépendre de la conductance stomatique vers l'atmosphère.
- La libération lors d'une blessure.
- La libération de la production de COV consécutive à une blessure.

Le principal processus qui gouverne les émissions de COV est la diffusion, selon un gradient de pression partielle des composés depuis l'intérieur des cellules où les concentrations sont relativement élevées vers l'air qui entoure la feuille où les concentrations sont faibles et où la pression partielle est basse. D'après la loi de diffusion (première loi de Fick), le flux d'un COV est lié au facteur de diffusion du composé (x), à la différence de pression de vapeur (P_v) du composé entre l'intérieur et l'extérieur de la feuille et à un terme de résistance. L'équation 3.1 traduit cette relation.

$$\text{Flux d'émission} = k \frac{(P_{v_x, \text{feuille}} - P_{v_x, \text{atmosphère}})}{\text{résistance}}. \quad (3.1)$$

Cette relation peut être simplifiée en considérant la pression de vapeur du composé dans l'air autour de la feuille comme négligeable. Cependant les termes de résistance et de coefficient de diffusion sont complexes et mal connus. Le coefficient de diffusion est déterminé par la taille et la forme du composé, du média à travers lequel il diffuse ainsi que par la température (*Tingey et al.*, 1991).

Pour la plupart des COV, les coefficients de diffusion à travers les cellules, les membranes, les parois des cellules sont inconnus. Le taux de diffusion est aussi contrôlé par la distance à parcourir par le composé qui est difficile à évaluer étant donné la complexité de l'architecture d'une feuille. Le terme résistance dans l'équation 3.1 est en fait la somme

de plusieurs résistances. Par exemple, en considérant que l'isoprène est produit dans les chloroplastes, son transit vers l'extérieur de la feuille dépend de la résistance des membranes intérieures et extérieures du chloroplaste puis de la résistance du cytoplasme, de la membrane plasmique, de la paroi cellulaire, des espaces intercellulaires puis des stomates. Plusieurs études ont montré que l'isoprène est quasi uniquement émis à travers les stomates (*Monson et al.*, 1995; *Loreto et al.*, 1996a) et il semblerait que ces émissions ne soient pas influencées par la conductance stomatique.

Dans le cas des plantes émettrices de monoterpènes, trois cas sont différenciés. Pour les pins, les monoterpènes sont stockés dans des réservoirs internes tels que des conduits de sève, le terme de résistance comprend principalement la résistance des cellules épithéliales parenchymateuses qui entourent les conduits de résine, des espaces intercellulaires et puis les stomates. Pour les plantes qui stockent les monoterpènes dans les trichomes qui sont des excroissances extérieures (souvent des poils glandulaires, exemple chez la menthe) la résistance principale est celle de la cuticule. Enfin, pour les plantes dont les émissions de monoterpènes sont dépendantes de la lumière, il est probable que la résistance soit identique à celle décrite auparavant pour l'isoprène.

Lorsque une plante subit des dommages, les réservoirs contenant des monoterpènes et des terpènes non volatils sont alors exposés à l'air libre et les émissions de monoterpènes sont immédiatement multipliées. Cet effet peut durer pendant des périodes assez longues puisque le contenu des réservoirs exposés peut s'écouler et laisser libre l'évaporation des COV. À cet effet s'ajoute la libération de COV dont la production est la conséquence d'une blessure.

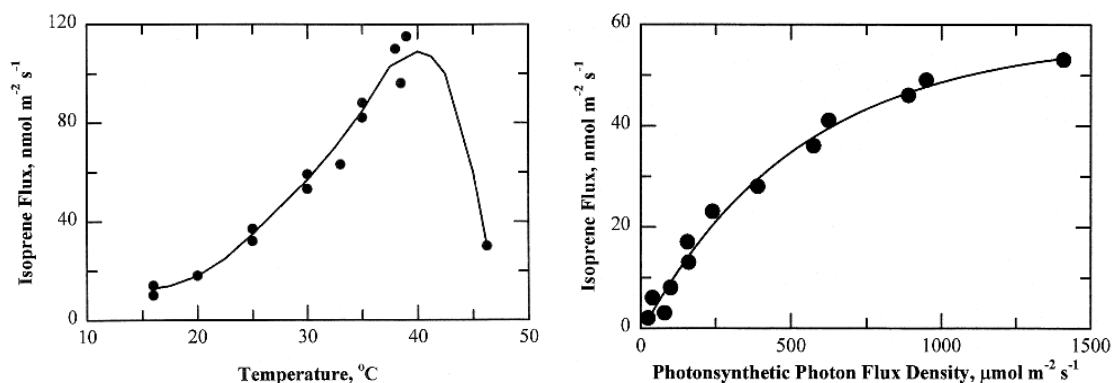
3.2.5 Facteurs de régulation des émissions

La température est le principal facteur contrôlant les émissions de COV par les végétaux. Ceci s'explique par le fait que la température augmente la pression de vapeur des composés et favorise donc leur diffusion à travers les membranes. Pour les composés stockés dans des conduits ou autres réservoirs de la plante, la température est le facteur de contrôle dominant des émissions. Pour les composés qui ne sont pas stockés dans la plante comme l'isoprène, les émissions sont directement en lien avec la production. En plus de la température, la lumière va donc aussi être un facteur de contrôle important puisqu'elle est nécessaire à la production de l'isoprène. La figure 3.2 montre l'influence de ces deux facteurs pour des feuilles de chêne blanc et de liquidambar.

Les émissions de monoterpènes sont généralement contrôlées par la température mais indépendantes de la lumière, à l'exception de certaines espèces dont les émissions sont partiellement dépendantes de la lumière, comme c'est le cas pour certains chênes et épicéas (*Loreto et al.*, 1996a; *Schürmann et al.*, 1993). Les jeunes aiguilles chez certains conifères peuvent également avoir des émissions de monoterpènes contrôlées par la lumière et la température (*Seufert et al.*, 1995). Cette observation a aussi été faite pour les émissions de sesquiterpènes qui semblent dépendre de manière générale de la température et très peu de la lumière (*Ciccioli et al.*, 1999; *Duhl et al.*, 2008).

L'effet de la température sur les émissions correspond bien à ce qui pourrait être prédit par la relation température et courbes de pression de vapeur. La pression de vapeur d'un composé dépend de sa volatilité et de la concentration dans la plante.

Après la température et l'ensoleillement qui sont des facteurs de contrôle des émissions à court terme, d'autres paramètres ont été étudiés comme l'humidité de l'air, la concen-



(a) Emissions d'isoprène en fonction de la température pour les feuilles de chêne blanc (*Quercus alba*). (b) Emissions d'isoprène en fonction du rayonnement photosynthétiquement actif pour des feuilles de chêne blanc (*Quercus alba*) et de Liquidambar (*Liquidambar styraciflua*).

FIGURE 3.2 — Influence de la température et de la lumière sur les flux d'isoprène (Harley et al., 1996; Fuentes et al., 2000). Les flux sont exprimés par m² de surface foliaire. Chaque point correspond à une mesure et la ligne continue indique la tendance.

tration en CO₂ ou encore la disponibilité en azote ou en eau de la plante. Par ailleurs, un effet stimulant de l'ozone a été observé sur les émissions d'isoprène par les feuilles de peuplier (*Populus alba*) (Fares et al., 2006).

L'humidité de l'air ne semble pas modifier les émissions d'isoprène et de monoterpènes chez les pins, épicéa et eucalyptus (Yokouchi and Ambe, 1984; Juuti et al., 1990; Janson, 1993; Guenther et al., 1991). Cependant dans certains cas on observe un effet positif sur les émissions de monoterpènes chez la sauge, la menthe et le chêne (Dement et al., 1975; Croteau, 1977; Loreto et al., 1996b). Ceci peut s'expliquer par la modification de la perméabilité de la cuticule des feuilles lorsqu'elle est hydratée.

Pour le CO₂ aucune tendance claire n'a été observée à part pour des concentrations très fortes ou très faibles qui ont eu un effet négatif sur les émissions (Guenther et al., 1991).

L'azote est nécessaire pour l'activité des enzymes et une corrélation positive entre les flux d'isoprène et le contenu en azote des feuilles a pu être observée (Litvak et al., 1996). Dans le cas d'un déficit en eau dans la plante, l'effet sur les émissions est complexe car même si les émissions diminuent avec l'amenuisement de la disponibilité en eau, l'augmentation de température due à la baisse de la transpiration entraîne un effet inverse. Au final, le déficit en eau est souvent responsable d'une augmentation des émissions (Lerdau and Keller, 1997; Fang et al., 1996).

D'autre part, une claire tendance saisonnière affecte les émissions de COV. En effet, le stade de développement de la plante (l'apparition des bourgeons, des fleurs, des fruits, la sénescence des feuilles) et l'état de dormance de la plante jouent un rôle important sur les émissions (Guenther, 1997; Robertson et al., 1995). Il a été montré que des plantes typiquement émettrices d'isoprène comme le saule (*Salix phylicifolia*) ou le tremble (*Populus tremula*) libéraient de grandes quantités de monoterpènes et autres alcènes au printemps pendant le débourrage (période d'éclosion des bourgeons) et les premiers stades de développement de la feuille. Les fortes émissions d'isoprène caractéristiques de ces espèces

ne commencent quant à elles que lorsque le feuillage a atteint sa maturité en été (*Hakola et al.*, 1998). Le stade de développement des feuilles est donc un facteur déterminant pour les émissions. Les jeunes feuilles qui n'ont pas encore atteint leur taille finale n'émettent pas d'isoprène et ne possèdent pas l'enzyme qui permet de le synthétiser (*Kuzma and Fall*, 1993). L'émission d'isoprène ne démarre qu'une fois la feuille complètement développée et plus précisément après une durée de plusieurs jours d'exposition à des températures suffisamment chaudes.

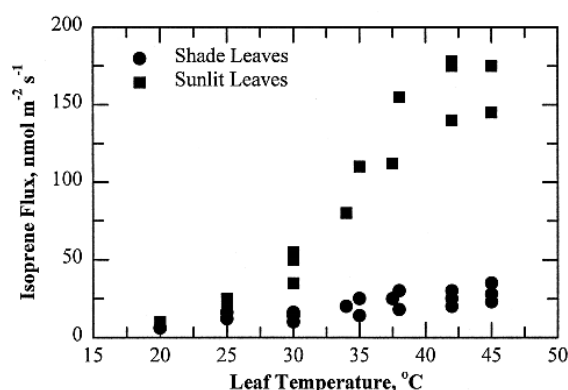


FIGURE 3.3 – Émissions d'isoprène par des feuilles de liquidambar (*Liquidambar styraciflua*) situées au sommet de la canopée (22 m) exposées au soleil (cercles), et par des feuilles situées dans l'ombre à l'intérieur de la canopée (carrés) (*Harley et al.*, 1996; *Fuentes et al.*, 2000). Les flux sont exprimés par m^2 de surface foliaire et les niveaux de rayonnement enregistrés durant les mesures sont de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Les conditions dans lesquelles se développent les feuilles peuvent aussi conditionner leurs émissions. Par exemple la figure 3.3 montre l'influence d'un environnement lumineux sur les feuilles : les feuilles se trouvant au sommet de la canopée dans un environnement très lumineux produisent des quantités plus importantes d'isoprène que les feuilles situées dans la canopée. Plusieurs autres études ont aussi montré des résultats similaires pour les émissions de monoterpènes (*Bertin et al.*, 1997; *Geron et al.*, 1997; *Harley et al.*, 1996, 1997; *Sharkey*, 1991, 1996; *Street et al.*, 1997).

Pour souligner que la variation des émissions en fonction des saisons est importante et doit être prise en compte pour les estimations, l'observation des émissions chez le pin parasol (*pinus pinea*) a montré qu'au cours de l'année, les taux d'émission pouvaient changer d'un facteur 20, que la nature des émissions s'en trouvait changée et que la réponse à court terme des émissions à la lumière était aussi modifiée (*Staudt et al.*, 1997, 2000).

3.3 Les COV dans l'atmosphère

Nous avons vu dans l'introduction de ce chapitre que les COV jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère à cause notamment de leur forte réactivité. Cet aspect est abordé dans cette section avec une description des principales réactions chimiques impliquant les COV et menant à la formation de polluants secondaires.

Une fois dans l'atmosphère, les COV peuvent être éliminés par des processus physiques de dépôt humide (pluies) ou sec et peuvent subir des transformations par photolyse ou par réaction avec des radicaux. L'importance de chacun de ces processus dépend des propriétés

physiques et chimiques des composés et détermine leur temps de vie dans l'atmosphère. De manière générale les processus de dépôt ne contribuent que très peu à l'élimination des COV sauf pour les espèces les plus inertes chimiquement. Les transformations par photolyse et les réactions chimiques représentent les principaux mécanismes d'élimination des COV et des produits de leurs réactions. Elles sont aussi à l'origine de la formation de certains polluants. Le tableau 3.1 présente les temps de vie d'une sélection de COV dans l'atmosphère en fonction du type de réaction. On peut noter que ces temps de vie sont très variables et peuvent être de quelques minutes seulement jusqu'à plusieurs années pour les moins réactifs.

3.3.1 Les COV, précurseurs de l'ozone troposphérique

L'ozone est un constituant naturel de l'atmosphère. Il est présent en abondance dans la stratosphère à plus de 20 km d'altitude (couche d'ozone) où il est utile pour intercepter une partie du rayonnement ultraviolet du soleil. On le rencontre aussi dans la troposphère en concentrations plus faibles. Contrairement à l'ozone stratosphérique, l'ozone troposphérique constitue une menace pour l'homme et les écosystèmes avec lesquels il est en contact direct. Ce problème est d'autant plus préoccupant que des observations ont montré que les concentrations de fond d'ozone dans la troposphère ont quadruplé au cours du XXème siècle en Europe de l'ouest (*Marenco et al.*, 1994).

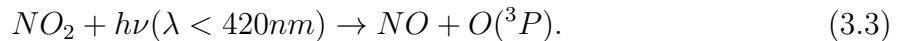
Les concentrations d'ozone sont surveillées dans la plupart des pays industrialisés et des seuils réglementaires ont été établis. En France, les seuils d'alerte et d'information sont respectivement de 240 et 180 $\mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne horaire. Ces seuils sont régulièrement dépassés en périphérie des grosses agglomérations comme dans la région de Marseille ou en Ile de France.

L'augmentation des concentrations d'ozone est directement liée aux émissions d'oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) associées à la combustion de carburant fossile et aggravée par la présence de COV. Les principales réactions chimiques qui gouvernent les concentrations d'ozone dans la troposphère sont présentées ci-dessous.

La principale source d'ozone dans l'atmosphère est la réaction d'un atome d'oxygène $\text{O}(^3\text{P})$ et d'une molécule de dioxygène (O_2) selon la réaction suivante :



L'atome $\text{O}(^3\text{P})$ est présent dans la basse troposphère uniquement grâce à la photolyse du dioxyde d'azote :



La réaction 3.2 étant très rapide, c'est la vitesse de photolyse du NO_2 qui va déterminer le taux de production d'ozone. Il n'y a pas de source naturelle directe de dioxyde d'azote. Il résulte de l'oxydation du monoxyde d'azote (NO) dont les sources naturelles majeures sont les éclairs et les émissions par les sols. Ces sources ne contribuent qu'à environ un cinquième du total, le reste étant constitué des sources anthropiques telles que la combustion de carburant fossile et la combustion de biomasse.

Dans le cas où les concentrations de NO_x sont suffisamment importantes, la principale voie de destruction de l'ozone est la réaction suivante :



composés organiques	temps de vie lié à			
	OH ^a	NO ₃ ^b	O ₃ ^c	photolyse ^d
propane	10 jr	~7 an	>4500 an	
n-butane	4,7 jr	2.8 an	>4500 an	
n-octane	1,3 jr	240 jr		
2,2,4-triméthylpentane	3,2 jr	1,4 an		
éthène	1,4 jr	225 jr	10 jr	
propène	5,3 hr	4,9 jr	1,6 jr	
trans-2-butène	2,2 hr	1,4 hr	2,1 hr	
isoprène	1,4 hr	50 mn	1,3 jr	
α-pinène	2,6 hr	5 mn	4,6 hr	
limonène	50 mn	3 mn	2,0 hr	
benzène	9,4 jr	> 4 an	> 4,5 an	
toluène	1,9 jr	1,9 an	> 4,5 an	
m-xylène	5,9 hr	200 jr	> 4,5 an	
1,2,4-triméthylbenzene	4,3 hr	26 jr	> 4,5 an	
styrène	2,4 hr	3,7 hr	1,0 jr	
phénol	5,3 hr	9 mn		
o-crésol	3,3 hr	2 mn	65 jr	
formaldéhyde	1,2 jr	80 jr	> 4,5 an	4 hr
acétaldéhyde	8,8 hr	17 jr	> 4,5 an	6 hr
butanal	5,9 hr			
benzaldéhyde	11 hr	18 jr		
acétone	53 jr	>11 an		~60 jr
2-butanone	10 jr			~4 jr
2-pentanone	2,4 jr			
glyoxal	1,1 jr			5 hr
methylglyoxal	9,3 hr		> 4,5 an	2 hr
2,3-butanedione	49 jr			1 hr
cis-butanedial	2,6 hr			~10 mn
cis-3-hexène-2,5-dione	2,1 hr	1,5 jr		~30 mn
cis, trans-2,4-hexadiènedial	1,3 hr	8,8 jr		1,9 hr
pinonaldéhyde	2,9 hr	2,3 jr	> 2,2 an	
méthanol	12 jr	1 an		
éthanol	3,5 jr	26 jr		
2-butanol	1,3 jr	17 jr		
dimethyl ether	4,1 jr	180 jr		
diethyl ether	11 jr	17 jr		
methyl ter-butyl ether	3,9 jr	72 jr		
ter-butyl formate	16 jr			
méthacroléine	4,1 hr	11 jr	15 jr	~1 jr
méthylvinylcétone	6,8 hr	>385 jr	3,6 an	~2 jr
éthylacétate	6,9 jr	10 an		
6-méthyl-5-heptène-2-one	50 mn	4 mn	55 mn	
3-méthyl-2-butène-3-ol	2,1 hr	3,8 jr	1,0 hr	
méthylhydroperoxyde	2,1 jr		1,7 jr	~5 jr
éthylnitrate	66 jr			~7 jr
2-butylnitrate	13 jr			15-30 jr

a : Calculé sur la base d'une concentration moyenne de $C_{OH} = 2,0 \cdot 10^6$ molécule.cm⁻³ sur 12 hr.

b : Calculé sur la base d'une concentration moyenne de $C_{NO_3} = 5,0 \cdot 10^8$ molécule.cm⁻³ sur 12 hr.

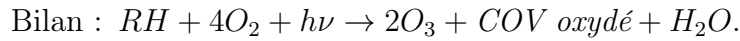
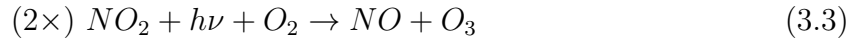
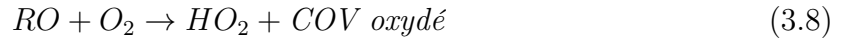
c : Calculé sur la base d'une concentration moyenne de $C_{O_3} = 7,0 \cdot 10^{11}$ molécule.cm⁻³ sur 24 hr.

d : Calculé pour des conditions d'ensoleillement maximales.

TABLE 3.1 – Temps de vie d'une sélection de COV calculés pour la photolyse, et les réactions avec les radicaux OH, NO₃ et O₃. D'après Atkinson (2000).

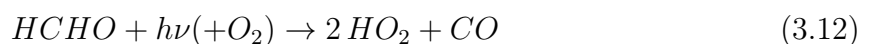
D'après les réactions 3.2 à 3.4 le NO_2 est successivement transformé en NO puis à nouveau en NO_2 et le bilan de production d'ozone est nul. Les concentrations d'ozone vont ainsi dépendre de la vitesse de photolyse du NO_2 et du rapport des concentrations NO_2/NO .

En réalité ces relations ne suffisent pas à expliquer les concentrations d'ozone observées pendant les épisodes de forte pollution. C'est un second mécanisme, impliquant les COV, qui va permettre de convertir le NO en NO_2 sans consommer de molécule d'ozone. Les COV (notés RH , R étant un radical organique) sont oxydés à travers un processus qui inclut les radicaux (OH , RO , RO_2 , HO_2) et qui est détaillé ici :



Lors de cette suite de réactions, les NO_x jouent le rôle de catalyseurs tandis que les COV sont consommés. De plus, le COV oxydé produit pourra à nouveau s'oxyder pour contribuer à la formation supplémentaire d'ozone jusqu'à finalement donner du CO_2 .

On peut alors estimer la formation d'ozone à l'aide de la vitesse de la réaction 3.9 étant donné que la photolyse du NO_2 (réaction 3.3) et la réaction 3.2 sont très rapides et ont un rendement proche de 100%. Plus généralement, on constate que la production d'ozone dépend de la présence de radicaux OH et HO_2 appelés HO_x . Ces radicaux peroxy assument la conversion de NO en NO_2 comme indiqué dans les réactions 3.7 et 3.9. Ils sont très réactifs et leur temps de vie est de l'ordre de la seconde. Présents en très faibles quantités dans l'atmosphère, leur concentration est régulée par le rapport entre l'efficacité des sources et des puits. Les sources de HO_x sont principalement d'origine photochimique ce qui a pour conséquence de limiter la production d'ozone la nuit. Voici leur principales voies de production :



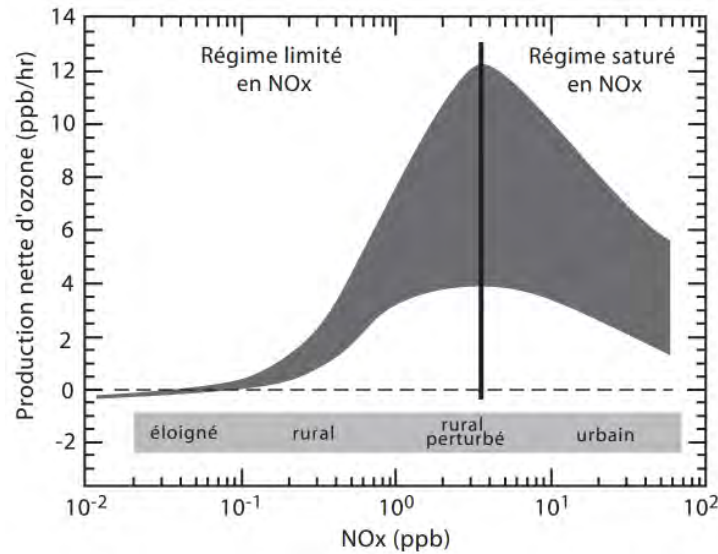


FIGURE 3.5 – Schéma illustrant la vitesse de production d'ozone en fonction de la quantité de NO_x . Cette vitesse de production peut varier de manière significative pour une concentration de NO_x donnée à cause de la dépendance aux concentrations de COV. Adapté par Aumont et al. (2005) d'après McKeen et al. (1991) et Liu et al. (1992).

Pour le régime limité en NO_x , on observe un régime de production et un régime de destruction de l'ozone selon les concentrations de NO_x . Lorsqu'il y a encore production d'ozone, celle-ci est directement liée à l'augmentation des NO_x . Si la masse d'air est trop pauvre en NO_x (< 10 ppt), l'ozone consommé par photolyse (réaction 3.10) n'est pas régénéré (Liu et al., 1992; Seinfeld and Pandis, 1998). On se trouve dans ce cas uniquement dans des zones éloignées des sources primaires, au-dessus de l'océan par exemple.

Il est maintenant intéressant d'appliquer ces différents mécanismes au cas d'un panache urbain. Une zone fortement urbanisée se caractérise par des niveaux élevés en NO_x avec des concentrations supérieures à plusieurs dizaines de ppb et un faible rapport de concentration COV/ NO_x (inférieur à 4). Au dessus de cette zone la vitesse de production de l'ozone est relativement lente, on se trouve dans la partie la plus à droite du schéma 3.5. Au fur et à mesure que la masse d'air s'éloigne de la ville, les concentrations en NO_x diminuent sous l'effet de dilution des masses d'air et de l'éloignement des sources. Par contre les concentrations en COV restent stables ou augmentent, alimentées par les sources biogéniques des zones rurales mais aussi à cause d'un temps de vie plus long que celui des NO_x . Avec l'évolution de la masse d'air, le rapport COV/ NO_x augmente et on se trouve dans le cas où la production d'ozone est maximale. Ceci explique les fortes concentrations d'ozone observées sous le vent des grandes agglomérations et souvent supérieures aux concentrations d'ozone observées au-dessus de la zone urbaine. La représentation en isopleth de la figure 3.6 résume ces situations en montrant les liens entre les concentrations d'ozone, de NO_x et de COV.

3.3.2 Rôle des COV dans la formation d'aérosols organiques secondaires

Les aérosols organiques secondaires (AOS) sont des particules formées à partir de la transformation dans l'atmosphère des composés organiques (volatils et non-volatils). Ces

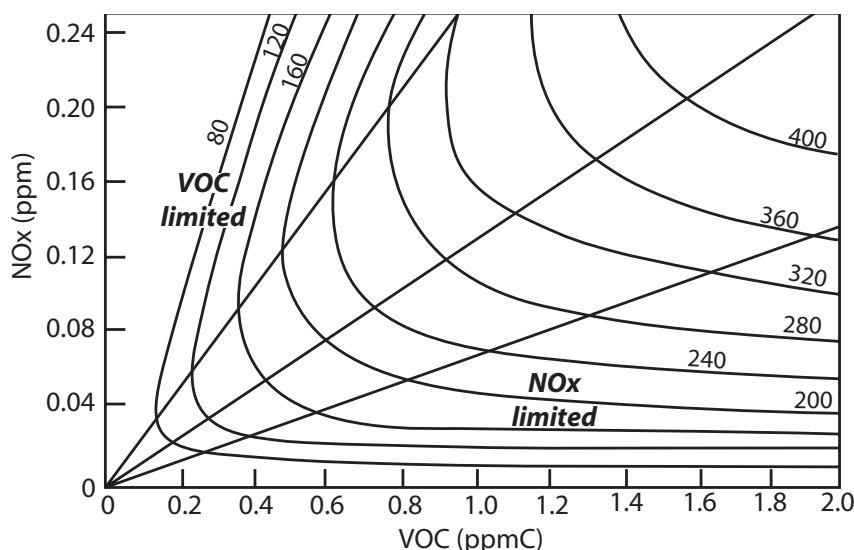


FIGURE 3.6 – Diagramme isopleth représentant les concentrations journalières maximales d'ozone par niveau d'iso concentration (ppb) en fonction des concentrations de NO_x et COV. D'après Sillman (1999).

particules représentent une part significative de l'aérosol atmosphérique. Les composés organiques constituent une portion importante des particules fines présentes dans l'atmosphère et constituent de 20 à 90 % de la masse des aérosols dans la basse troposphère (Kanakidou *et al.*, 2005).

La formation d'AOS est le résultat du processus de conversion de la phase gazeuse vers la phase particulaire (solide ou liquide). Cette conversion se fait par nucléation ou par condensation à des échelles de temps de l'ordre de la journée (Hallquist *et al.*, 2009). La pression de vapeur saturante des composés organiques va donc être le paramètre déterminant. Les composés ayant une faible volatilité (pression de vapeur saturante faible) sont le résultat d'une série complexe de réactions d'un grand nombre d'espèces organiques. Il est donc difficile de caractériser la formation d'AOS. Plusieurs mécanismes ont été identifiés comme abaissant la volatilité d'un composé. On peut citer les réactions d'oxydation en phase gazeuse et les réactions en phase particulaires. Le schéma 3.7 illustre l'oxydation d'un COV et précise les réactions qui sont susceptibles d'abaisser la volatilité du produit.

À l'heure actuelle les COV tels que les monoterpènes et les composés aromatiques sont considérés comme étant les principaux précurseurs de composés à faible volatilité qui se condensent pour former des AOS (Kroll and Seinfeld, 2008). Les modèles incluant ces paramétrisations ne parviennent pas à représenter la variabilité des quantités de SOA observées dans l'atmosphère (Heald *et al.*, 2006). Les prédictions des modèles s'avèrent largement sous-estimées ce qui laisse penser qu'il existe d'autres voies de formation d'AOS à considérer.

3.4 Modélisation des émissions de COV biogéniques

La modélisation des émissions de COV est une composante essentielle pour les modèles de chimie de l'atmosphère. La compilation d'informations spatiales et temporelles sur les quantités de COV libérées dans l'atmosphère constitue un inventaire d'émission. Ces inventaires peuvent être utilisés comme données d'entrée pour les modèles. Pour mieux

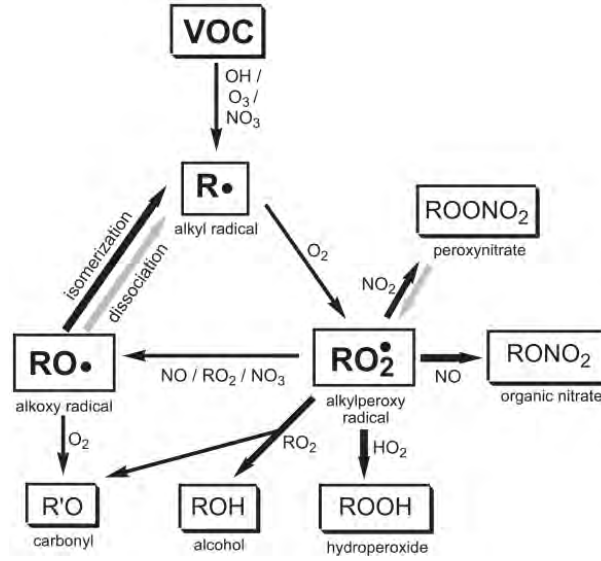


FIGURE 3.7 – Schéma simplifié des mécanismes d'oxydation atmosphérique d'un COV. Les flèches noires épaisses indiquent les réactions qui peuvent abaisser la volatilité (Kroll and Seinfeld, 2008).

représenter les émissions, ces inventaires peuvent intégrer une composante dynamique pour prendre en compte l'évolution des émissions en fonction des changements de l'environnement. On appelle ces inventaires dynamiques des modèles d'émissions. Des études multi-disciplinaires sur les sources de COV (biochimie, écologie) ont permis de mettre en avant les différents facteurs qui gouvernent les émissions. À partir de ces informations, l'approche générale d'un modèle d'émissions est de prédire le taux d'émission (E) pour une activité donnée (ϵ), du niveau d'activité (γ) et de la densité de la source (D). La relation obtenue :

$$E = \epsilon \gamma D, \quad (3.16)$$

est généralisable à plusieurs types de sources. La détermination de ces termes se fait à l'aide de mesures in situ. Il existe plusieurs types de techniques pour mesurer les flux de COV à différentes échelles et pour identifier comment les facteurs biologiques et environnementaux influencent les émissions (section 2.4). Un travail important a été effectué pour modéliser les émissions des COV les plus abondants c'est à dire l'isoprène et les monoterpènes. Le manque de données sur les autres composés et la faible importance des sources font que peu de travaux leur ont été consacrés. Dans cette section, nous présenterons uniquement les modélisations développées pour les émissions d'isoprène et de monoterpènes par les plantes.

La partie des végétaux qui émet des COV est le feuillage, le terme de densité de source a donc pour objectif de représenter la quantité de feuillage potentiellement producteur de COV sur une zone déterminée. Ce terme de densité foliaire est généralement exprimé en grammes de feuillage sec par unité de surface au sol (m²).

À l'échelle du globe, le manque de données fiables pose problème pour l'estimation de la densité foliaire d'autant plus qu'elle est directement liée aux cycles saisonniers et peut donc varier de zéro en hiver à un maximum en été pour les forêts de feuillus par exemple. L'utilisation d'observations satellitaires a permis d'améliorer les estimations mais certains problèmes persistent. Les observations satellitaires seules saturant lorsque les densités

foliaires sont élevées et ne suffisent pas à fournir des estimations fiables pour ces zones. D'autres techniques combinant des mesures aéroportées optiques (lidar) procurent des données plus précises mais leur déploiement est coûteux et elles ne sont disponibles que pour des zones limitées.

Pour le terme ϵ qui représente le taux d'émission pour des conditions standard, plusieurs éléments doivent être pris en compte. La détermination d'un taux d'émission repose avant tout sur une mesure de flux. Cette mesure est représentative d'une zone plus ou moins grande selon la technique utilisée. Pour des mesures à l'échelle de la branche, on détermine la masse sèche de feuillage de la branche étudiée par séchage et pesage. Pour des mesures à l'échelle de la canopée on utilise l'indice foliaire qui représente la surface foliaire par unité de surface au sol et la masse sèche de biomasse par surface de feuille pour calculer la masse de feuillage par m^2 au sol.

Le taux d'émission exprimé en micro grammes de COV émis par gramme de feuillage sec et par unité de temps ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) est spécifique à chaque espèce végétale. Au lieu d'utiliser la répartition de chaque espèce végétale, des classes de végétaux ont été créées selon les écosystèmes et un taux d'émission moyen est attribué à chaque classe selon les espèces qu'elle regroupe. Enfin, les taux d'émission mesurés expérimentalement doivent être normalisés aux conditions standard de température et de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (30°C et $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Le facteur d'activité (γ) prend en compte l'effet des principaux facteurs environnementaux qui contrôlent les émissions. Pour l'isoprène, il a été montré au début de ce chapitre que l'ensoleillement et la température étaient les facteurs de contrôle les plus importants. *Guenther et al.* (1993) ont développé des relations simulant l'influence de ces deux paramètres. Le facteur d'activité s'écrit alors, pour les émissions d'isoprène, $\gamma = C_L C_T$ avec C_L et C_T deux coefficients prenant respectivement en compte les effets de l'ensoleillement et de la température. L'effet de la lumière sur l'activité est calculé suivant la relation suivante :

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L_{PAR}}{\sqrt{1 + \alpha^2 L_{PAR}^2}}, \quad (3.17)$$

avec α ($= 0,0027$) et C_{L1} ($= 1,066$) des coefficient empiriques et L_{PAR} (en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) est le flux de PAR.

L'effet des variations de température est calculé de la manière suivante :

$$C_T = \frac{\exp\left(\frac{C_{T1}(T-T_S)}{RTT_S}\right)}{C_{T3} + \exp\left(\frac{C_{T2}(T-T_M)}{RTT_S}\right)}, \quad (3.18)$$

où R est la constante des gaz parfaits ($= 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$), C_{T1} ($= 95000 \text{ J mol}^{-1}$), C_{T2} ($= 230000 \text{ J mol}^{-1}$), C_{T3} ($= 0,961 \text{ J mol}^{-1}$) et T_M ($= 314 \text{ K}$) sont des coefficients empiriques, T (K) est la température des feuilles et T_S (K) est la température aux conditions standard. Les autres facteurs pouvant avoir un effet sur l'activité comme l'âge des feuilles, la disponibilité en eau et autres stress ne possèdent à l'heure actuelle pas d'algorithme permettant de simuler leurs influences.

Pour les monoterpènes l'activité est essentiellement dépendante de la température et la relation proposée par *Guenther et al.* (1993) est :

$$\gamma = \exp(\beta[T - T_S]), \quad (3.19)$$

où β ($= 0,09 \text{ K}^{-1}$) est un coefficient empirique.

Les émissions annuelles d'isoprène et de monoterpènes ont été estimées à l'échelle globale à 500-750 Tg(C) et 115-480 Tg(C) respectivement (*Guenther et al.*, 1995, 2006). En Europe, les campagnes de mesures BEMA (Biogenic Emissions in the Mediterranean Area) (*Seufert, G.*, 1997), BIPHOREP (Biogenic VOC emissions and PHOto-chemistry in the boreal regions of Europe) (*Laurila et al.*, 1999) et ESCOMPTE (fiEld experimentS to COnstrain Models of atmospheric Pollution and Transport of Emissions) (*Cros et al.*, 2004) ont permis d'étoffer les données de flux pour certaines espèces et de proposer des inventaires d'émission notamment pour la France (*Simon et al.*, 2006).

3.5 Conclusion

Le terme composé organique volatil regroupe un grand nombre d'espèces chimiques organiques. Ces composés sont libérés dans l'atmosphère par deux sources principales : la végétation et les activités anthropiques. A l'échelle du globe, les émissions par la végétation dominent d'un ordre de grandeur les autres sources. Les raisons pour lesquelles la végétation libère ces composés dans l'atmosphère ne sont pas bien connues. Il est probable que les plantes utilisent les COV pour se défendre d'une perturbation extérieure ou comme voie de communication inter-espèces. La nature des composés émis par la végétation varie d'une espèce à l'autre et selon le facteur déclencheur, cependant l'isoprène et la famille des monoterpènes sont les composés dominants des émissions biogéniques. Leurs émissions proviennent du feuillage et les quantités libérées dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température.

Dans l'atmosphère ces composés sont oxydés sur des échelles de temps courtes de l'ordre de la minute à l'heure et participent à la formation de polluants secondaires. Ces polluants sont principalement l'ozone troposphérique et les aérosols organiques secondaires. Il est donc d'autant plus important d'étudier les COV en tant que précurseurs de pollution que l'ozone et les particules (dont les aérosols organiques secondaires) sont au centre des préoccupations à cause de leurs effets nocifs sur les êtres humains et la végétation.

De grandes incertitudes demeurent sur la quantification des émissions et de la charge en COV biogénique dans l'atmosphère et il est nécessaire de conduire des mesures in situ pour améliorer la caractérisation des sources par le biais de la modélisation notamment.

Chapitre 4

Développement instrumental : MEDEE

4.1 Introduction

La méthode Disjunct Eddy Covariance est adaptée à la mesure des flux d'espèces en trace réactives (COV , NO_x , O_3 ...) et permet l'utilisation d'une plus grande variété d'analyseurs par rapport à la méthode EC. La mise en œuvre de la technique DEC nécessite un système de prélèvement d'échantillon d'air spécifique. Le projet MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) a été créé dans le but de réaliser un tel dispositif. Le développement s'intègre dans le programme *ChArMEx* pour lequel il sera mis en œuvre pour la mesure des émissions biogéniques de COV au sol ou en avion.

Ce chapitre est consacré au développement instrumental du système MEDEE. Le développement de MEDEE a représenté une partie importante de ce travail de thèse et s'est déroulé avec des collaborations entre le Laboratoire d'Aérodynamique, son service électronique et le Groupe d'Instrumentation Scientifique (GIS) de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP).

Les principales étapes du développement instrumental sont abordées dans ce chapitre. Dans un premier temps une description d'un prototype de système de prélèvement pour DEC déjà existant est faite. Puis la définition du besoin pour l'application aux espèces en trace réactives est présentée, accompagnée d'un résumé du cahier des charges. Les solutions techniques imaginées à partir du cahier des charges sont présentées. Ensuite les principaux points de la phase de conception du système mécanique sont décrits. Le système conçu est présenté dans son ensemble ainsi que les filières de traitement des données qui ont été développées spécifiquement pour calculer les flux par la méthode DEC.

4.2 Analyse d'un prototype existant

Développé et réalisé au Centre de recherche de Météo-France (CNRM) à Toulouse en 2001-2002 ce prototype avait pour vocation de valider la méthode DEC proposée par Rinne *et al.* (2001). Ce système de prélèvement a été conçu pour la mesure des flux de CO_2 et de vapeur d'eau par la méthode DEC. Une comparaison des mesures de flux de chaleur latente par DEC en utilisant ce dispositif et par EC avec un analyseur rapide du commerce a permis de valider ce système (Rinne *et al.*, 2008). Un schéma du dispositif est donné dans la figure 4.1.

Ce prototype est composé de deux réservoirs de volume fixe équipés chacun d'une électrovanne à l'avant et d'une électrovanne à l'arrière. Le prélèvement d'un échantillon se fait

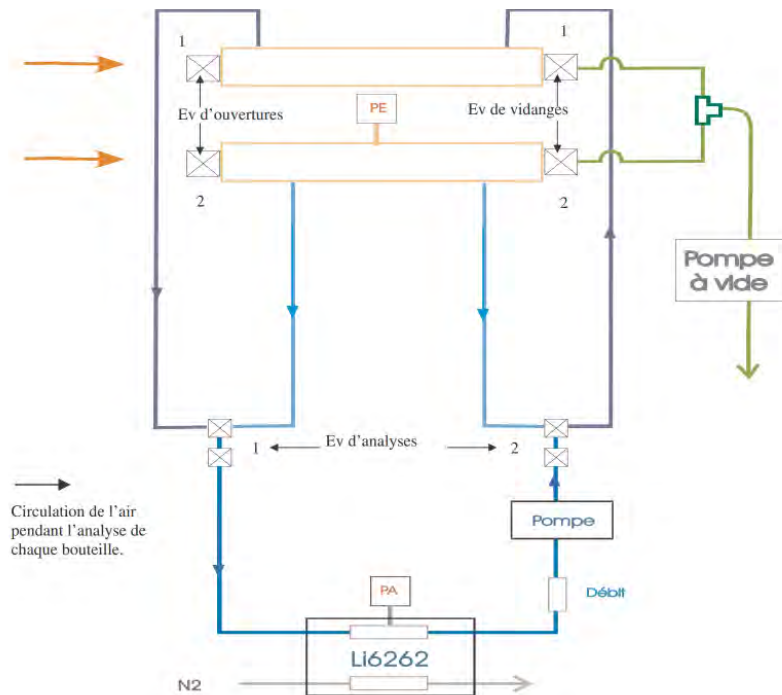


FIGURE 4.1 – Schéma de principe du prototype de système de prélèvement pour la méthode DEC réalisé au CNRM (MétéoFrance), d'après Lemarchand (2003).

par l'ouverture de l'électrovanne située à l'avant du réservoir. Le vide étant préalablement fait dans le réservoir grâce à la pompe à vide, l'échantillon est aspiré dans un intervalle de temps court. Chaque réservoir est connecté à un circuit pneumatique permettant de faire circuler l'échantillon entre le réservoir et un analyseur (LI-COR 6262) en circuit fermé. Deux électrovannes d'analyse sont permutées pour acheminer l'échantillon vers l'analyseur selon qu'il provient d'un réservoir ou de l'autre. Une pompe et un régulateur de débit sont placés sur le circuit d'analyse afin d'assurer un écoulement continu de l'échantillon dans l'analyseur. Des capteurs de pression sont installés sur plusieurs points du système pour vérifier le niveau du vide dans les réservoirs avant le prélèvement et la pression dans l'analyseur pour s'assurer qu'il n'y a pas de perturbations.

Un cycle de fonctionnement se déroule en quatre étapes :

- Mise sous vide :
Un réservoir est mis sous vide grâce à la pompe à vide. L'électrovanne de vidange est ouverte et celle de prélèvement est fermée. Lorsqu'un niveau de vide satisfaisant est atteint l'électrovanne de vidange est refermée et le réservoir est prêt pour la capture d'un volume d'air.
- Prélèvement :
L'électrovanne à l'avant du réservoir est ouverte pour laisser entrer un échantillon. L'électrovanne est laissée ouverte pendant une durée de 200 ms qui correspond au temps de capture de l'échantillon. Au bout de 200 ms la pression dans le réservoir est proche de la pression atmosphérique.
- Analyse :
Après le prélèvement, les électrovannes d'analyse sont ouvertes et l'échantillon circule en circuit fermé entre le réservoir, la pompe, le débitmètre, l'analyseur et les tubes qui les relient.

Les cycles de prélèvement de chaque réservoir fonctionnent en alternance de manière à ce que l'analyseur reçoive un débit d'air constant. La durée totale d'un cycle est de 21,4 s dont 10 s pour la vidange, 0,2 s pour le prélèvement et 10,5 s pour l'analyse. Les 0,7 s restantes représentent la somme des périodes de latence lors du passage d'une étape à l'autre.

Les électrovannes rapides utilisées pour le prélèvement et la vidange sont de la marque Burkert, modèle DN15 (24 V, G 1/2, 0-1 bar, 9 W). Pour l'analyse, les électrovannes sont de la marque Buschjost (0-2 bar, 24 V, 12 W). Les réservoirs sont produits par EM-TECHNIK GMBH (D-67100 Maxdorf) et la référence des capteurs de pression est PMP 1400 GE Sensing. La pompe à vide utilisée est de type pompe à huile. La pompe externe pour l'analyse est une KNF-NEUBERGER (type NMP30 KNDC, 12 V, 0,5A, 1 bar max).

Le système de prélèvement est piloté et alimenté en puissance par plusieurs boîtiers. Ces boîtiers comprennent des alimentations pour les électrovannes et capteurs de pression, un micro-contrôleur programmable qui commande le cycle de fonctionnement du système et des relais qui commandent l'ouverture ou la fermeture des électrovannes.

Sur le terrain, le système de prélèvement et d'analyse est complété par un anémomètre sonique et une centrale d'acquisition pour la mesure du vent et l'enregistrement de l'ensemble des données.

Ce prototype présente néanmoins des limitations majeures liées à la re-circulation de l'échantillon dans le réservoir au cours de l'analyse. La re-circulation de l'échantillon pose un problème car elle implique que l'analyseur ne contamine ou ne détruise pas l'échantillon. Cette contrainte est forte car la plupart des analyseurs de composés en trace réactifs sont destructifs. De plus, les matériaux qui composent les réservoirs et le circuit fluide ne sont pas compatibles avec des espèces réactives et présentent des risques de contamination de l'échantillon. Enfin, la conception et les matériaux de ce prototype ne sont pas compatibles avec une utilisation en avion pour des mesures aéroportées. Pour ces raisons, une nouvelle solution a été étudiée.

4.3 Définition du besoin et cahier des charges

L'objectif est de concevoir et réaliser un instrument capable de mettre en œuvre la méthode DEC au sol et en avion et d'être compatible avec plusieurs types d'analyseurs dont les analyseurs de COV. Nous allons voir maintenant les enjeux déterminants qui ont guidé la démarche de conception.

4.3.1 Énoncé du besoin

La capture de l'échantillon d'air doit être rapide ($\leq 0,2$ s) pour ne pas perdre la partie du flux transporté par les tourbillons de petites échelles temporelles et spatiales. Le calcul de flux faisant intervenir la covariance des fluctuations de la vitesse verticale de l'air et du rapport de mélange de l'espèce étudiée, la datation des échantillons doit être précise et permettre une synchronisation de ces deux variables. L'intervalle de temps entre deux captures d'échantillons doit être ajustable et inférieur à 60 s afin de garantir un nombre d'échantillons mesurés pendant une période de 30 mn supérieur ou égal à 60. En deçà, l'incertitude sur les flux devient du même ordre de grandeur que la mesure. Un intervalle de temps inférieur à une seconde n'est pas justifié car l'utilisation d'un système

de prélèvement est prévu pour des analyseurs relativement lents. Pour des analyseurs plus rapides, la technique EC est plus adaptée.

L'échantillon capturé doit être transféré du système de prélèvement à l'analyseur connecté en ligne. Le système de prélèvement doit fournir des conditions qui assurent un bon fonctionnement de l'analyseur. Les analyseurs FIS et PTR-MS susceptibles d'être utilisés avec MEDEE pour les mesures de flux de COV sont particulièrement sensibles aux variations de pression. Par ailleurs, ces instruments sont destructeurs vis à vis de l'échantillon, il n'est donc pas possible de réinjecter l'échantillon dans le réservoir pour conserver une pression constante pendant l'analyse. Le système de prélèvement doit être capable de compenser la chute de pression dans le réservoir pendant le transfert de l'échantillon vers l'analyseur.

Le débit de pompage nécessaire au PTR-MS est relativement faible (100 - 200 ml mn^{-1}) par contre il est assez élevé pour le FIS (3,5 - 4 l mn^{-1}). Ces analyseurs fonctionnent en continu et le débit d'air qu'ils reçoivent doit être constant. Le volume de l'échantillon capturé par le système de prélèvement doit donc être suffisamment important pour assurer une analyse qui dure jusqu'à l'analyse de l'échantillon suivant.

Les espèces en trace comme les COV sont des molécules réactives chimiquement qui peuvent être détruites au contact de certains matériaux. Les matériaux utilisés pour la réalisation du système et en particulier les matériaux directement en contact avec l'échantillon doivent être choisis pour minimiser ces risques de destruction de l'échantillon. D'autre part, de nombreuses surfaces peuvent libérer des composés susceptibles de contaminer l'échantillon. Le téflon et l'inox 316L constituent des matériaux inertes bien adaptés à ces contraintes.

L'ensemble du dispositif de prélèvement doit pouvoir être déployé sur des infrastructures légères (tour-échafaudages) à plusieurs mètres au-dessus de la végétation.

Pour les inventaires d'émission à l'échelle régionale, l'utilisation de moyens aéroportés permet des mesures de flux à des échelles spatiales de l'ordre de la dizaine de kilomètres adaptées aux échelles de ces inventaires. Un ensemble de contraintes découle d'une utilisation en avion. La construction doit respecter les normes aéronautiques et être certifiée. Il s'agit de pouvoir résister à des accélérations fortes, ne pas générer de perturbation électromagnétique, et d'utiliser des connecteurs et gaines électriques de qualité aéronautique. Au niveau de l'encombrement, l'instrument doit pouvoir être installé dans une baie avion de 19" de l'ATR-42 de l'unité SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement).

L'instrument doit pouvoir fonctionner en autonomie et en continu pendant plusieurs jours pour l'utilisation au sol et pendant environ 5 h en vol.

La capture de l'échantillon doit se faire au plus proche de la mesure de vent turbulent de façon à limiter le décalage temporel entre les mesures des deux variables.

Pour éviter une contamination par l'échantillon précédent les volumes morts en amont et en aval du réservoir contenant l'échantillon doivent être minimisés. De la même façon, la vidange du réservoir avant la capture d'un nouvel échantillon doit être optimisée pour éliminer les traces de l'échantillon précédent.

Finalement l'instrument doit être équipé pour enregistrer l'ensemble des données nécessaires au calcul des flux pour l'utilisation au sol, et une grande partie des données pour l'utilisation aéroportée.

4.3.2 Résumé du cahier des charges

Le cahier des charges traduit le besoin en une liste exhaustive de critères d'appréciation et leur niveau de flexibilité associé. Ce document est présenté en annexe 1. Il a été rédigé par Lei Liu, étudiant ingénieur en mécanique lors de son stage de fin d'étude au Laboratoire d'Aérodynamique en 2009. Dans cette section nous rappelons les contraintes majeures du système. L'utilisation en vol impose les contraintes fortes du cahier des charges.

Contraintes principales de l'utilisation dans l'avion :

- Fixation adaptée à la baie de 19 pouces (dimensions intérieures : 576 mm de large, 565 mm de profondeur, 1304 mm de haut).
- Masse totale admissible dans la baie : 120 kg.
- Alimentation électrique en 28 V DC en vol et 220 V / 50 Hz au sol.
- Consommation électrique minimisée.
- Efforts maximum admissibles en tout point d'un rail de fixation : $F_{avant} < 12080$ N, $F_{latéral} < 6190$ N, $F_{haut} < 14600$ N.
- Priorité aux matériaux légers, ininflammables et ne dégageant pas de fumées toxiques.
- Construction simple et utilisation d'outils standards.
- Transport et démontage faciles pour maintenance.
- Notice détaillée avec procédure de réglage et calibrage.

Contraintes principales de l'utilisation en général :

- Capture rapide de l'échantillon.
- Débit réglable de 4 l mn⁻¹ à 0,5 l mn⁻¹.
- Pression constante en continu à ± 50 hPa vers l'analyseur.
- Volume des échantillons réglable de 0,2 à 1 l selon les analyseurs couplés au système.
- Niveau de vide inférieur à 40 hPa dans le réservoir de prélèvement.
- Visualisation de contrôle du fonctionnement du système et des données en temps réel.
- Interrupteur d'arrêt d'urgence.
- Résistance à des températures comprises entre 5 et 45 °C et une humidité relative comprise entre 40 et 100 %.
- Matériaux (en contact avec les échantillons) inertes aux composés en trace réactifs principaux dont les COV.
- Précision entre le moment de mesure et capture < 20 ms avec une résolution < 25 ms.
- Accessibilité aux réglages des paramètres de fonctionnement de l'instrument sans démonter l'instrument.

4.3.3 Préconcepts

La définition du besoin puis l'élaboration d'un cahier des charges sont suivies d'une étape d'identification de plusieurs voies technologiques possibles. Différents préconcepts ont été proposés et une analyse de chacune des solutions techniques a permis de ne garder que la solution la plus adaptée pour répondre au cahier des charges. Cette étude a aussi été réalisée par Lei Lui dans le cadre de son stage de fin d'étude en 2009.

Trois concepts ont été proposés et sont décrits ci-dessous :

Préconcept A : Piston

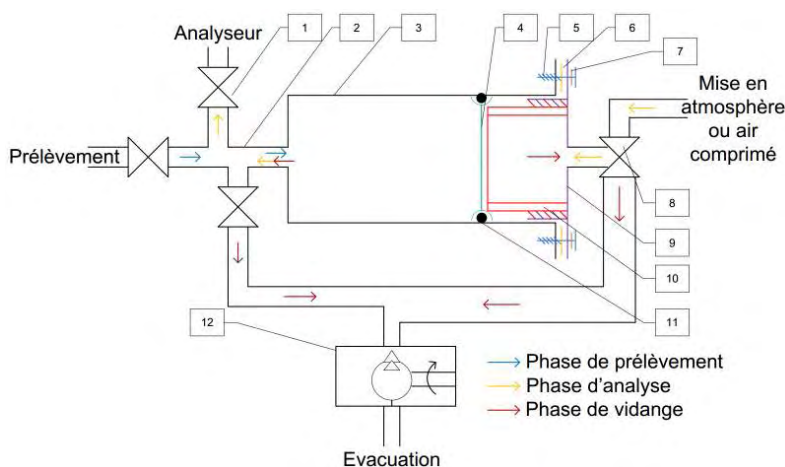


FIGURE 4.2 – Schéma du préconcept piston A. Voir table 4.1 pour la nomenclature.

La première solution, illustrée par le schéma 4.2, consiste en un réservoir à volume variable dont l'entrée dispose de trois électrovannes qui dirigent le flux d'air en fonction des phases de fonctionnement. Un piston (élément n°4) présent dans le réservoir forme deux compartiments. Le compartiment à gauche (élément n°3) correspond au réservoir de prélèvement et de l'autre côté, un volume sert au déplacement du piston. Le piston se déplace en fonction de la différence de pression entre ces deux compartiments. Une pompe à vide permet de faire le vide dans le volume complet (carter, élément n°9) avec une première phase pour "aspirer" le piston contre une butée (n°10) avant de faire le vide dans le compartiment de l'échantillon. Le prélèvement est fait par ouverture de l'électrovanne de prélèvement puis sa fermeture. Lors de la période d'analyse la chute de pression dans le réservoir entraîne le déplacement du piston et est donc compensée.

La force de frottement du piston sur les parois ne peut être nulle ce qui implique que la pression dans le réservoir sera légèrement inférieure à la pression atmosphérique ou à la pression générée par compression. Le volume disponible pour l'échantillon est déterminé par le positionnement de la butée et donc réglable. L'idée est de doubler ce système pour assurer une alimentation en continu d'air vers l'analyseur grâce un fonctionnement alterné de la même façon que pour le prototype présenté en début de chapitre.

Les avantages que présenterait ce préconcept sont un volume d'échantillon réglable, une relative simplicité du système et un repositionnement automatique du piston pendant la vidange.

Les inconvénients sont une nécessité de maintenance pour le piston et le joint, et une fabrication spécifique du réservoir. Les difficultés sont de pouvoir minimiser les frottements entre la paroi du réservoir et le joint du piston pour faciliter l'équilibrage des pressions et le déplacement du piston et de maîtriser le débit de vidange pour le repositionnement du piston sans choc sur la butée.

Cette solution n'a pas été retenue car la force à exercer sur le joint du piston est difficile à déterminer. Il faut assurer l'étanchéité entre les deux compartiments sans augmenter la force de frottement pour ne pas gêner le déplacement du piston. L'idée d'utiliser une bouteille d'air comprimée ne peut aboutir étant donnée la grande consommation de gaz qu'elle implique.

REP.	NB.	Désignation
12	1	Pompe à vide
11	1	Joint de piston
10	1	Butée fileté
9	1	Carter
8	1	Électrovanne à 3 voies
7	4	Rondelle plate
6	4	Joint d'étanchéité
5	4	Vis de fixation
4	1	Piston
3	1	Réservoir 1 L
2	1	Tuyauterie PTFE
1	3	Électrovanne à 2 voies

TABLE 4.1 – Nomenclature du préconcept piston pour le schéma 4.2.

Une alternative serait d'utiliser un ballon gonflable à l'intérieur du réservoir pour éviter de devoir réguler la pression. Le ballon se gonflerait lors de la chute de pression dans le réservoir pendant l'analyse. Cette alternative n'est pas non plus retenue car il n'a pas été possible de trouver un matériau inerte au COV et assez résistant pour assurer un grand nombre de cycles.

Préconcept B : Régulateur

Le préconcept régulateur consiste à utiliser un régulateur de pression du commerce en amont de l'analyseur. Cette solution implique l'utilisation d'un compresseur pour assurer une surpression en amont du régulateur (nécessaire à son fonctionnement). Le prélèvement se fait par aspiration dans les réservoirs qui ont préalablement été mis sous vide avec la pompe à vide. Les échantillons sont ensuite transférés dans un second réservoir tampon par le compresseur et mis sous pression. Le régulateur contrôle ensuite le transit vers l'analyseur. Le système est doublé pour fonctionner en alternance et assurer ainsi une alimentation continue vers l'analyseur (figure 4.3).

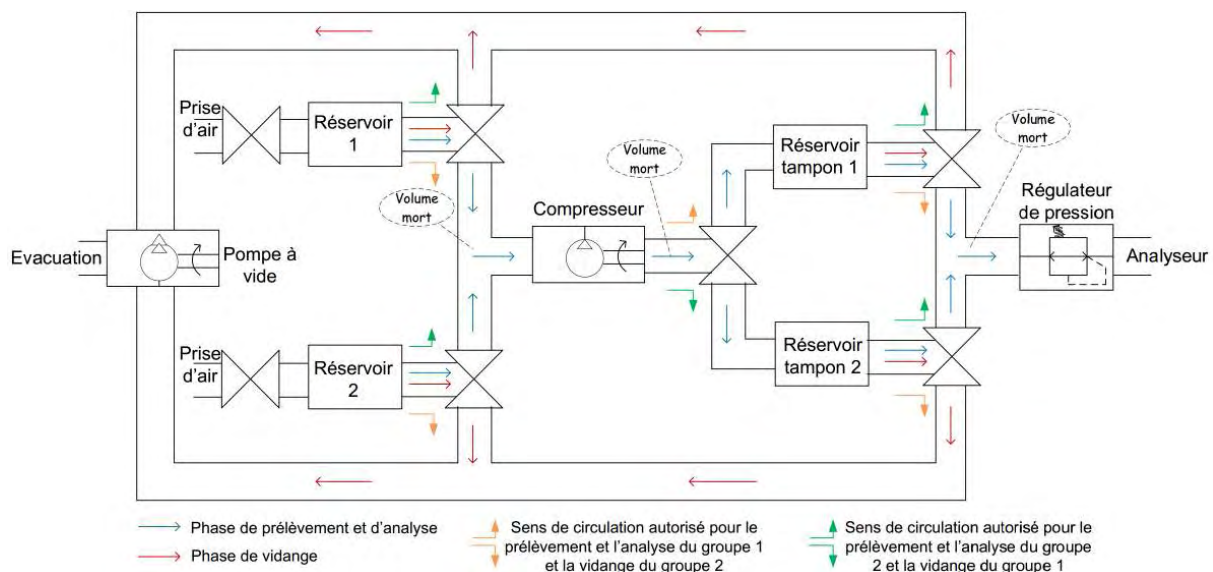


FIGURE 4.3 – Schéma du préconcept B régulateur.

Les avantages de cette solution sont de ne pas avoir à faire de retouche mécanique sur les réservoirs et de n'utiliser que des pièces standards sans fabrication particulière. Les inconvénients sont une certaine complexité du système, des volumes morts importants et la nécessité de capturer des volumes largement supérieurs au volume du réservoir tampon pour être pressurisés. Cette complexité entraîne une rapidité médiocre et beaucoup d'éléments à contrôler pendant le fonctionnement.

La synchronisation du système en fonction des différents temps de réponse des éléments semble difficile pour cette solution. Il en est de même pour le choix du régulateur de pression et du compresseur dans le but d'assurer un débit suffisant pendant l'analyse. Cependant cette solution a été étudiée avec plus d'intérêt car elle ne fait intervenir que des composants de catalogue, ce qui facilite grandement la maintenance. La recherche de compresseur en matériaux inertes capables de garantir 10 s d'analyse a été infructueuse et la solution a été abandonnée.

Préconcept C : Vérin

Le troisième préconcept met en œuvre un vérin électrique. Comme pour les préconcepts précédents le système est doublé et composé de deux réservoirs dont chaque entrée est contrôlée par trois électrovannes. Dans un réservoir, un piston actionné par un vérin électrique se déplace et fait varier le volume du réservoir (voir schéma figure 4.4). Le prélèvement rapide se fait par l'ouverture de l'électrovanne de prélèvement lorsque le réservoir est sous vide. Pendant la période d'analyse la chute de pression due à l'aspiration de l'analyseur est compensée par le déplacement du piston mis en mouvement par le vérin électrique. À la fin de l'analyse le volume d'échantillon restant est chassé par le piston jusqu'à arriver en butée puis le piston est ramené à sa position initiale avec toutes les électrovannes fermées pour la mise sous vide à la façon d'une seringue dont l'entrée est bouchée.

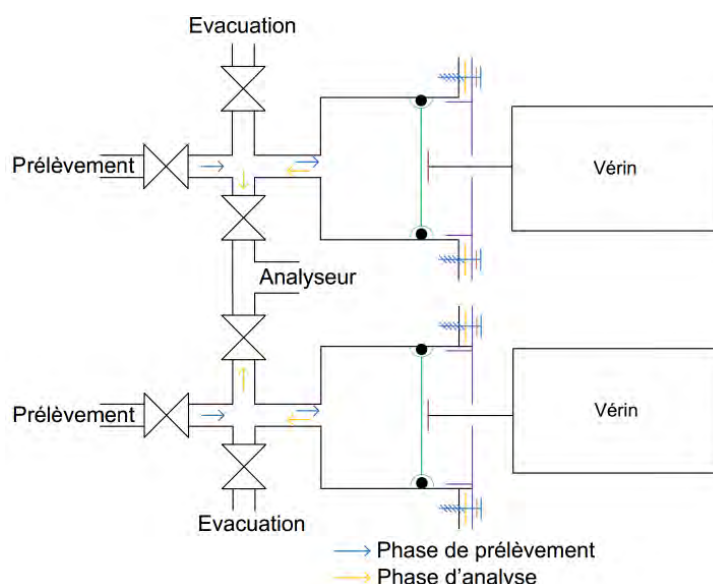


FIGURE 4.4 – Schéma du préconcept C vérin.

Les avantages de ce préconcept sont de pouvoir contrôler précisément le volume du réservoir et de pouvoir repositionner le piston par actionnement du vérin. Ce système est

aussi relativement simple car il ne nécessite a priori pas de pompe à vide. Par contre, il nécessite de fabriquer spécifiquement le réservoir et entraîne une maintenance pour le piston et les joints. Les difficultés que pose cette solution sont la régulation de la position en fonction de la pression et la maîtrise du volume d'air restant afin de créer un vide acceptable.

Il existe différents types de vérins électriques selon la technologie utilisée pour transformer la rotation du moteur en mouvement de translation du bras. Le vérin à courroie crantée est rapide mais moins précis que les vérins à vis trapézoïdale ou par vis à bille. Les vérins sont toujours couplés à un automate qui contrôle la vitesse de rotation du moteur et son couple. Les moteurs avec variateur de fréquence sont capables d'effectuer des tâches complexes. L'idée pour cette solution est d'utiliser le signal d'un capteur de pression dans le réservoir pour asservir la position ou vitesse de déplacement du piston/vérin et assurer une pression de consigne proche de la pression atmosphérique.

Après plusieurs échanges avec les constructeurs de vérins électriques l'utilisation d'un régulateur PID ("Proportionnel Intégral Dérivé") de la position du piston en fonction de la pression dans le réservoir semble être la solution la plus efficace pour répondre aux exigences du système. Cette solution a donc été retenue.

4.4 Conception et mise au point de MEDEE

La conception de l'instrument a commencé avec le début de ma thèse en octobre 2009, à la suite de l'élaboration du cahier des charges et du choix d'une solution technique. Mon rôle en tant que coordinateur scientifique du projet a été de participer au dimensionnement et à la recherche de fournisseurs pour certains éléments du système comme les vérins électriques. J'ai aussi participé à la définition des cycles de fonctionnement de l'instrument. Christian Jarnot, ingénieur électronicien au Laboratoire d'Aérodynamique a été en charge de la coordination technique du projet et responsable de la partie contrôle/commande. Deux élèves ingénieurs ont été mobilisés pour leur projet de fin d'études. Romain Mathon, élève ingénieur en mécanique, a été en charge de la conception de la partie mécanique du système de prélèvement avec l'appui du Groupement d'Instrument Scientifique (GIS) et en particulier de Nicolas Striebig (tuteur du stage) et Driss Kouach (*Mathon*, 2010). Le GIS est une unité de l'OMP destinée à fournir un support technique aux différents laboratoires dans la réalisation de projets d'instrumentation. Ce bureau d'étude intervient principalement dans les domaines de la mécanique et du thermique. Guillaume Sokoloff, élève ingénieur en systèmes embarqués, a travaillé sur la réalisation de la partie contrôle/commande sous la direction de Christian Jarnot et avec l'aide de Jean-Michel Martin (*Sokoloff*, 2010). Un stage effectué au début de l'année 2009 par Vincent Lagorse, élève ingénieur de l'école nationale de la Météo, aussi encadré par Christian Jarnot a permis de mettre au point une carte de séquence utilisée dans la partie contrôle/commande (*Lagorse*, 2009). Du point de vue scientifique, Pierre Durand et Corinne Jambert du Laboratoire d'Aérodynamique ont été à l'origine du projet MEDEE et ont participé au suivi du projet. L'instrument MEDEE a été terminé au mois de juin 2010. Il a été déployé sur le terrain pour plusieurs campagnes de mesures et a subi des améliorations tout au long de son utilisation.

Il n'a pas été prévu de construire plusieurs versions du système de prélèvement et l'unique version devait donc répondre aux contraintes liées aux environnements au sol et en avion. Il s'agit alors de considérer les contraintes les plus restrictives du cahier des charges

pour la conception et la réalisation. La partie mécanique du système de prélèvement est donc directement conçue pour son installation dans l'avion où les contraintes sont les plus fortes. Les autres parties du système (électronique de pilotage, alimentation électrique, acquisition des données) sont moins impactées par ces limitations et ont fait l'objet d'une adaptation pour l'utilisation de l'instrument au sol ou en avion.

4.4.1 Conception et réalisation de la partie mécanique du système de prélèvement

Les contraintes d'installation dans l'avion imposent le cadre le plus restrictif. L'encombrement admissible pour l'ensemble de l'instrument est strictement limité au volume d'une baie 19" de 130 cm de hauteur. La répartition dans cet espace restreint, en considérant l'ensemble des éléments nécessaires au bon fonctionnement de l'instrument, a fait l'objet d'une étude spécifique qui a permis de définir un volume de 483 mm de large par 248 mm de profondeur et de 755 mm de hauteur dédié uniquement à la partie mécanique du système de prélèvement (figure 4.5). Cette partie du système comprend deux vérins électriques, deux réservoirs cylindriques avec leurs pistons respectifs et six électrovannes.

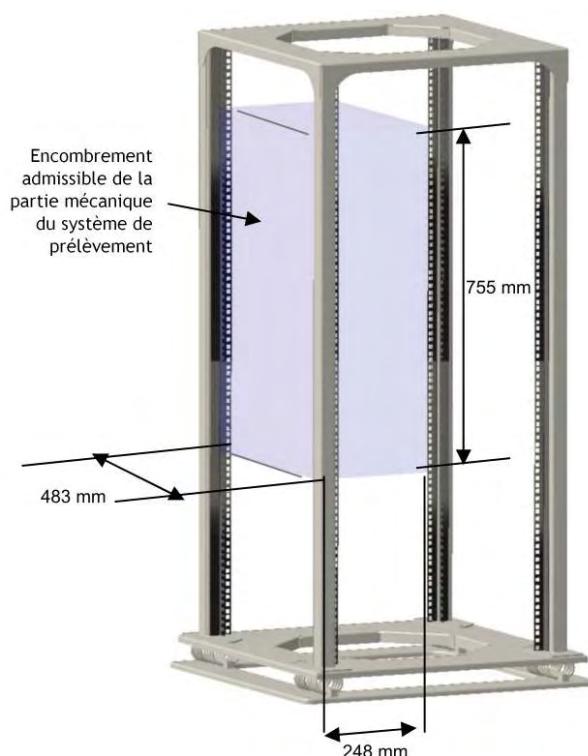


FIGURE 4.5 – *Encombrement admissible de la partie mécanique du système de prélèvement dans la baie avion.*

Certains éléments clés de la conception ont nécessité une étude préalable. Il s'agit de la géométrie du réservoir, de la précision sur le positionnement du piston, de l'étanchéité entre le piston et le réservoir, de l'alignement entre le vérin et le réservoir et du dimensionnement de la tuyauterie. Le positionnement des organes pour optimiser le temps de prélèvement a aussi été étudié en amont.

Pour faire le vide dans le réservoir, la force à appliquer sur le piston dépend de la surface du piston (force de pression) et de la surface en périphérie du piston en contact

avec le réservoir (forces de frottement) tout deux proportionnels au diamètre du piston. Pour un volume maximum fixé à 1 l, le choix du diamètre du réservoir détermine aussi sa longueur. Un compromis intéressant a pu être trouvé pour un diamètre de 100 mm. Une étude de la précision nécessaire sur le déplacement du piston pour assurer une régulation de la pression à 50 hPa près a montré que les caractéristiques des vérins étaient de plusieurs ordres de grandeur meilleures que la contrainte et donc que cet aspect n'était pas limitant.

L'étanchéité entre le piston et le réservoir est un élément clé du système. En effet cette étanchéité est indispensable à son bon fonctionnement car elle évite toute contamination extérieure possible de l'échantillon et permet de mettre sous vide le réservoir. L'étanchéité doit être assurée en statique et en dynamique lorsqu'il y a translation du piston dans le réservoir. Après plusieurs échanges avec les fournisseurs et des simulations (calcul approché), l'utilisation d'un joint à lèvres est apparue comme la solution idéale pour les raisons suivantes : le joint à lèvres donne la possibilité de contrôler l'effort circonférentiel créé par le ressort qu'il intègre en modifiant sa raideur, la zone de contact avec la paroi du réservoir est limitée (limite les frottements) et la géométrie est tout à fait adaptée à la création d'une dépression (figure 4.8). En effet, la dépression dans le réservoir renforce l'étanchéité du joint en plaquant la lèvre sur la paroi.

Pour assurer l'alignement entre le piston et le réservoir il a fallu trouver une liaison qui permette de garantir l'isostatisme du système. La solution la plus simple a été d'utiliser un accouplement axial pour connecter le piston au bras du vérin qui compense des défauts d'alignement de 2 à 3 mm radialement et angulairement de 5° autour de l'axe de la tige du vérin.

Après de nombreuses étapes intermédiaires dans la phase de conception, une maquette numérique (CAO) réaliste a été réalisée. Le résultat obtenu est présenté dans la figure 4.6. Le système est modulaire pour faciliter l'intégration et la maintenance. Il est composé de cinq modules dont deux modules de prélèvement, un module électrovanne, un module connecteurs et une plaque de fixation renforcée qui sert à maintenir ces organes entre eux et dans la baie.

Les modules de prélèvement

Chaque module de prélèvement est constitué d'un vérin, d'un piston, d'un réservoir et d'autres éléments mineurs que l'on détaillera par étape (figure 4.7).

Le piston, en inox 316L, est usiné de façon à recevoir le joint à lèvres pour assurer l'étanchéité et un coussinet en PTFE qui sert de guide dans le réservoir (figure 4.8). Une tige au centre permet la fixation avec l'accouplement axial qui est lui même connecté au bras du vérin. Il s'est avéré que cet accouplement axial contenait de la graisse pour la lubrification. Or, tout type de lubrifiant est à proscrire à cause des dégagements potentiels de composés organiques. Pour éviter la contamination des parois du réservoir, un soufflet en PTFE a été installé pour isoler hermétiquement cette partie.

Le réservoir est un tube en inox 316L d'épaisseur 5 mm et de diamètre intérieur 100 mm. Pour faciliter son positionnement dans l'axe du vérin il est fixé sur le nez du vérin à l'arrière et par une équerre à l'avant. Un flasque ferme le cylindre à l'avant et permet le raccordement aux électrovannes et à un capteur de pression. Un second flasque à l'arrière du cylindre permet sa fixation au nez du vérin. Le piston se situe à l'intérieur de cette enceinte. Chaque flasque est muni d'un joint torique en position radiale pour l'étanchéité. Ces joints toriques sont en FKM, un matériau reconnu comme inerte aux COV. Pour éviter un changement de pression trop important à l'arrière du piston le flasque arrière

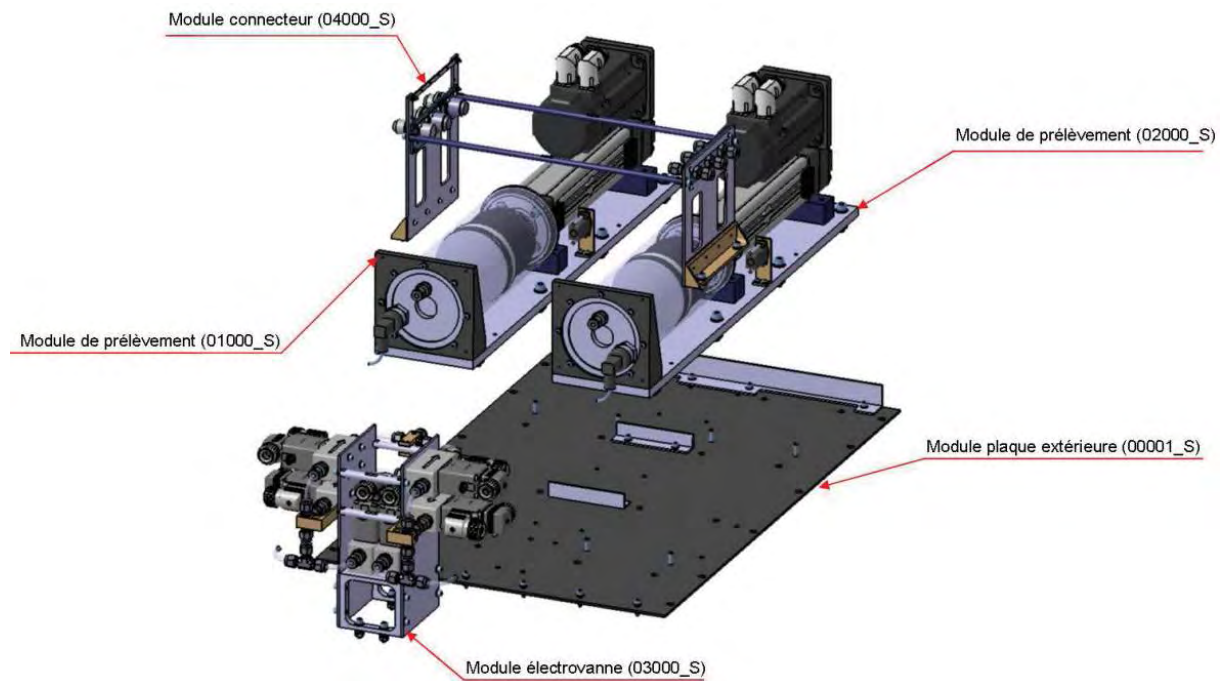


FIGURE 4.6 – Modélisation 3D de la partie mécanique du système de prélèvement. Présentation des cinq modules principaux (Mathon, 2010).

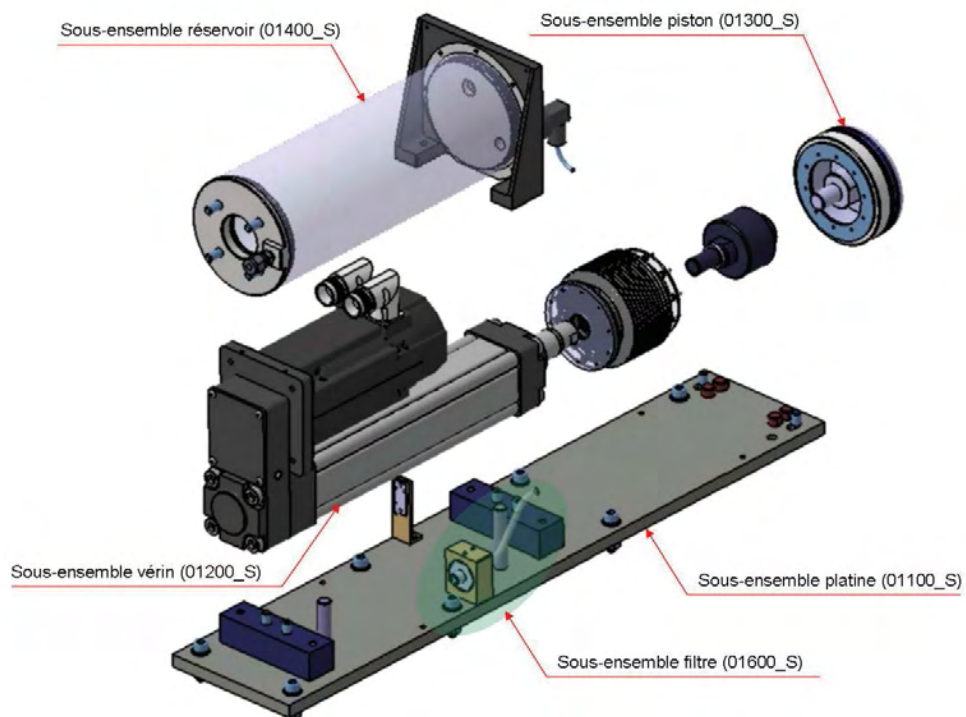


FIGURE 4.7 – Détail du module de prélèvement.

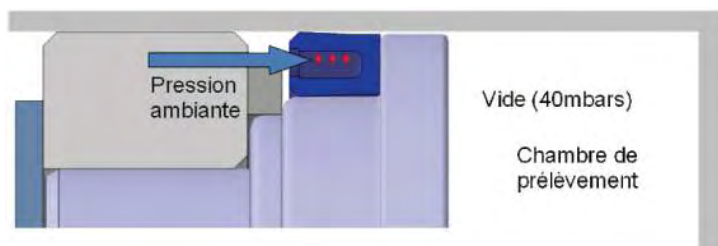


FIGURE 4.8 – *Détail du positionnement du joint à lèvres entre le piston et le réservoir. Le piston est de couleur bleu clair, le joint à lèvres est en bleu foncé et le guide est en gris clair.*

dispose d'une ouverture sur laquelle est connecté un filtre. Le filtre empêche les poussières d'entrer dans cette enceinte et de perturber le système.

Un capteur de pression (WIKA A-10, WIKA Instruments) a été intégré sur chaque flasque avant des réservoirs. Le modèle utilisé ici dispose d'une étendue de mesure de 0 à 1600 hPa avec une précision de 1 hPa et un temps de réponse de 4 ms. La partie du capteur en contact avec l'échantillon est en inox 316L.

Les vérins utilisés sont des vérins à vis à billes (PARKER ref. ETB50-M05PA67 EMA160). La course utile de 130 mm est entièrement utilisée dans notre application. Ils sont équipés chacun d'un moteur brushless (KOLLMORGEN ref. AKM42E-GC-CNR-00). L'encombrement d'un vérin (tige rentrée) avec moteur est de 428,5 mm de long pour 90 mm de large et 200 mm de haut.

Une platine en aluminium équipée de pions permet de fixer avec précision les vérins et l'ensemble du réservoir. La platine a été ajourée pour minimiser son poids mais étant donné les poids à supporter (8 kg pour le vérin et 5 kg pour l'ensemble du réservoir et piston) une étude par éléments finis a été réalisée (Mathon, 2010) pour optimiser sa géométrie sans perdre de résistance.

Le module électrovanne

Le module électrovanne regroupe les six électrovannes (Bürkert, type 121) du système qui servent à diriger le flux d'air pour chaque réservoir selon les étapes de fonctionnement (prélèvement, analyse, évacuation). Les temps de réponse des électrovannes sont compris entre 15 et 25 ms et le diamètre d'ouverture est de 6 mm. Il est conçu de manière à respecter les contraintes d'encombrement et limiter les volumes morts afin de garantir le niveau de vide requis (figure 4.6). Les pertes de charge sont aussi minimisées pour assurer un prélèvement rapide des échantillons. Les électrovannes sont fixées sur un support pour former un T. Les électrovannes d'analyse et d'évacuation sont placées latéralement tandis que les électrovannes de prélèvement sont placées au centre. Les raccords sont de marque Swagelok et en inox 316L, le tube PTFE utilisé possède un diamètre externe de 1/4" (6,4 mm) et un diamètre interne de 4 mm. Il n'a pas été possible d'atteindre un volume mort assez faible pour garantir un vide suffisant lors d'un prélèvement d'un échantillon de 0,2 l (volume adapté pour l'utilisation d'un analyseur à débit de pompage faible comme le PTR-MS). En effet les volumes morts présents dans les électrovannes sont relativement importants et représentent à eux seuls 80 % du volume mort autorisé par le cahier des charges. La solution envisagée est de prélever un échantillon de volume supérieur (1 l) et d'évacuer ensuite le surplus d'échantillon après la phase l'analyse.

Le module connecteurs

Le module connecteurs permet de faire l'interface entre la partie mécanique du système de prélèvement et les autres éléments du système. Deux zones de raccordement sont disposées de part et d'autre des modules de prélèvement (figure 4.6). D'un côté se trouve la zone de raccordement au circuit fluide (prélèvement, analyseur, évacuation), et de l'autre les connecteurs permettant de se relier au circuit électrique (alimentation et commande des électrovannes, signal des capteurs de pression). Les connecteurs des deux modules sont individualisés dans le cas où un des modules devrait être testé à part.

La plaque extérieure

La plaque extérieure sert de support de fixation à l'ensemble de la partie mécanique et permet une intégration dans la baie. Elle possède deux bords appuyés sur le rail de la baie et deux bords libres qui sont renforcés. La plaque est en aluminium pour la légèreté du matériau et a subi une anodisation pour résister à la corrosion. Une étude par éléments finis (*Mathon, 2010*) a aussi été réalisée pour cette pièce pour s'assurer que la limite à rupture ne sera pas dépassée sous les charges maximales lors de vols. La visserie du système a fait l'objet d'une justification pour s'assurer de la bonne tenue de l'ensemble et du respect du cahier des charges. La figure 4.9 montre l'ensemble du système de prélèvement monté sur la plaque.

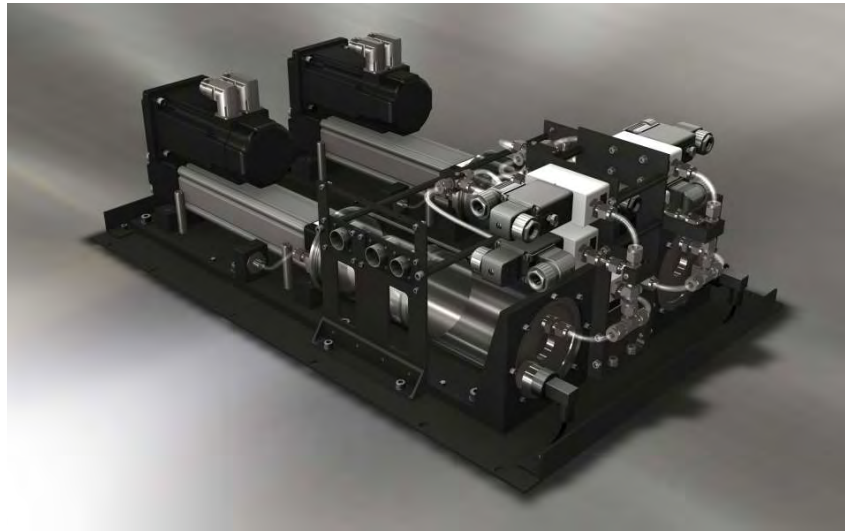


FIGURE 4.9 – Rendu 3D du système de prélèvement de MEDEE.

4.4.2 Réalisation de la partie contrôle/commande

Le système de prélèvement a besoin d'un "chef d'orchestre" pour déclencher l'ouverture ou la fermeture des électrovannes à des temps précis ainsi que pour contrôler les actions du vérin. Les micro-contrôleurs programmables offrent une précision à la milliseconde et constituent un outil adapté pour cadencer un tel système. Ils peuvent par l'intermédiaire de relais piloter des électrovannes, mais ne suffisent pas pour effectuer les tâches plus complexes de commande des vérins. Il existe des ordinateurs miniaturisés qui sont conçus

pour fonctionner sur des systèmes embarqués. L'avantage de ce type d'ordinateur (CV-sever, Kontron) est un encombrement réduit, une résistance aux chocs et à la poussière et une consommation électrique faible. Installé sur un ordinateur, le logiciel Labview (National Instrument) peut répondre à plusieurs demandes du cahier des charges. Il a permis de piloter les vérins avec un régulateur en boucle fermée PID (PID, pour « proportionnel intégral dérivé ») en fonction de la pression dans les réservoirs et permet d'afficher en direct les paramètres indiquant l'état de fonctionnement du système. Ce dispositif a été conçu pour la partie contrôle/commande du système MEDEE. Le schéma 4.10 permet de visualiser le rôle et les interactions des différents éléments de la partie commande telle qu'elle a été réalisée.

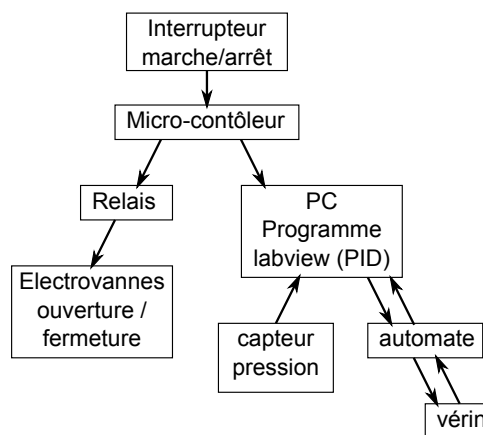


FIGURE 4.10 – Schéma illustrant les éléments de la partie commande et leurs interactions.

Le micro-contrôleur envoie les ordres aux électrovannes et à l'ordinateur. Ces ordres obéissent à un cycle rythmé dans le temps qui sera décrit par la suite. Le programme sur l'ordinateur traduit l'ordre du micro-contrôleur et en fonction des informations qu'il reçoit du capteur de pression, va actionner le piston. L'intermédiaire entre l'ordinateur et le vérin appelé automate fournit la puissance électrique nécessaire au moteur pour déplacer le bras du vérin à la vitesse demandée.

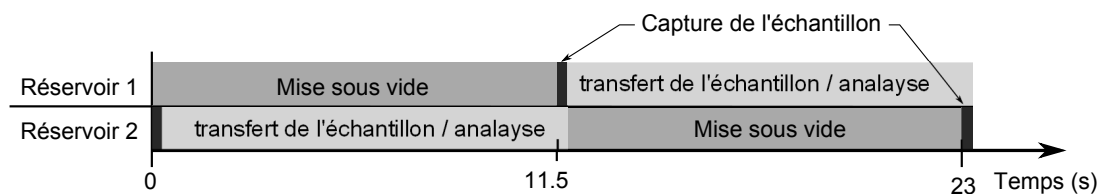


FIGURE 4.11 – Chronogramme des cycles de prélèvement de MEDEE.

Le cycle de fonctionnement normal du système de prélèvement est composé de trois phases : le prélèvement ou capture de l'échantillon, le transfert de l'échantillon vers l'analyseur et la vidange ou mise sous vide du réservoir (figure 4.11). Ce cycle a été traduit en une série d'actions réparties dans le temps. Le chronogramme complet de la figure 4.12 illustre l'ensemble de ces actions qui correspondent aux ordres donnés par le micro-contrôleur.

À la mise sous tension du système, une phase d'initialisation est automatiquement déclenchée. Elle consiste à ouvrir les électrovannes de prélèvement et les électrovannes

d'analyse sur les deux réservoirs afin d'équilibrer à pression ambiante les deux circuits et laisser la possibilité à l'analyseur connecté de pomper librement l'air à travers le système.

Cette phase dure jusqu'à ce que l'opérateur actionne l'interrupteur de démarrage du système. Au démarrage, le réservoir 2 reste ouvert et le réservoir 1 est vidangé puis mis sous vide. Une fois prêt, la capture d'un échantillon dans le réservoir 1 est déclenchée immédiatement ou en synchronisation avec un signal extérieur. Pendant ce temps le réservoir 2 se prépare pour la capture d'un autre échantillon pour alimenter l'analyseur après le passage du premier échantillon. Les cycles se répètent ensuite indéfiniment jusqu'à l'arrêt du système par l'opérateur qui déclenche une procédure de mise au repos.

La procédure d'arrêt a pour but d'équilibrer la pression des réservoirs avec la pression ambiante en évitant une variation de pression brutale pour l'analyseur et en laissant circuler librement l'air à travers les réservoirs pour ne pas interrompre le débit d'air vers l'analyseur.

L'acquisition des signaux de MEDEE et des capteurs associés (anémomètre sonique, analyseurs) est effectuée par un programme Labview sur le PC embarqué.

Le PC embarqué possède une puissance de calcul importante (Pentium-M 1,4 GHz, 256 MB RAM) et un espace de stockage de 20 Go, ce qui autorise une durée supérieure à 10 jours d'enregistrement. Les signaux des capteurs de pression sont enregistrés à une cadence de 20 Hz, tandis que les signaux de l'anémomètre et de l'analyseur le sont à une cadence de 10 Hz.

4.4.3 Améliorations de MEDEE

Les premiers tests en laboratoire de l'instrument ont révélé une insuffisance dans la rapidité de capture de l'échantillon due à une perte de charge trop grande dans le circuit entre la prise d'air et le réservoir. Pour remédier à ce problème le tube téflon de diamètre intérieur 4 mm a été remplacé par du tube de diamètre intérieur 9,6 mm (diamètre externe 1/2" ou 12,8 mm). Cette modification a permis d'améliorer la vitesse de capture avec des temps de prélèvement de 400 ms mais l'objectif des 200 ms n'a pas été atteint à cause d'une perte de charge importante au niveau des électrovannes de prélèvement (Bürkert 121, diamètre intérieur 6 mm). En effet le principe de fonctionnement de ce type d'électrovanne implique que le flux d'air doit contourner un clapet. Cet obstacle est limitant pour la vitesse de capture. Une recherche a donc été engagée pour remplacer ces électrovannes de prélèvement par des électrovannes avec un diamètre intérieur plus important et une construction qui ne présente pas un obstacle pour le flux d'air. Étant donnée la rareté d'un tel produit, de plus fabriqué en matériaux inertes au COV (téflon, inox 316L), les électrovannes d'origine ont été conservées pour les premières utilisations de MEDEE sur le terrain (chapitre 6). Par la suite, des électrovannes (PeterPaul, 72B11DCM) en inox 316L avec un orifice de diamètre 1/2" offrant des débits importants ont été utilisées pour le prélèvement (chapitre 5).

Le remplacement des tubes de prélèvement par des tubes de diamètre supérieur entraîne une augmentation du volume du réservoir. L'action du piston étant limitée au réservoir cylindrique, il n'est plus possible d'atteindre la qualité de vide déterminée dans le cahier des charges. Une pompe à vide a donc été ajoutée au système et connectée sur le circuit d'évacuation (figure 4.13). L'ajout de la pompe à vide permet de déporter les électrovannes de prélèvement plus près du point de mesure avec des longueurs de tube supérieures au mètre entre l'électrovanne de prélèvement et le réservoir tout en respectant

la qualité de vide définie dans le cahier des charges.

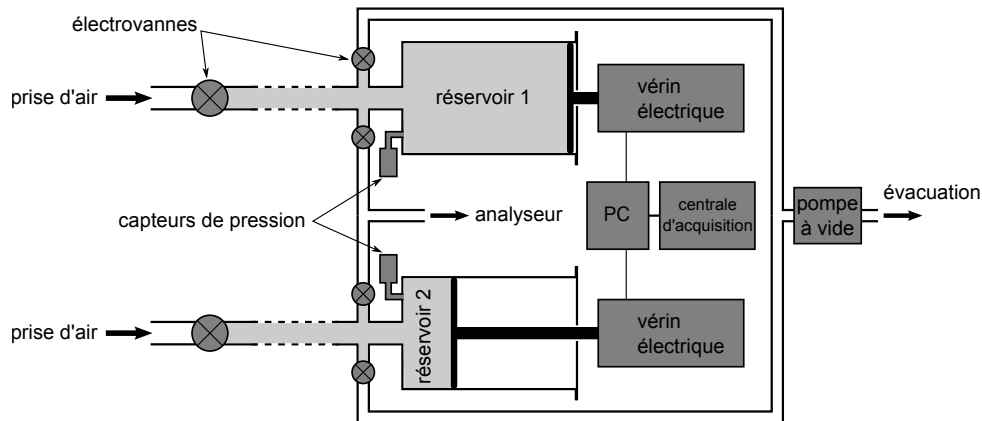


FIGURE 4.13 – Schéma du système de prélèvement de MEDEE avec pompe à vide.

L'utilisation du PC embarqué comme centrale d'acquisition pour les mesures ne constitue pas une solution optimale à cause d'une mauvaise régularité des enregistrements. La cadence de 10 Hz ou 20 Hz selon les signaux n'est pas respectée et n'est pas constante dans le temps. Pour les signaux enregistrés à 20 Hz, on observe en réalité une cadence comprise entre 20 et 25 Hz. Des lacunes d'enregistrement durant de 1 à plusieurs secondes sont aussi observées fréquemment dans les enregistrements (4 à 5 occurrences par heure). Ces problèmes impliquent un travail de post-traitement des données plus lourd et compromettent l'utilisation de certaines périodes de mesures. Une autre solution a donc été envisagée pour l'enregistrement des données. Le choix a été porté sur une centrale d'acquisition de type CR1000 (data-logger, Campbell Sci) qui possède 16 voies d'entrées analogiques et numériques et intègre un micro-contrôleur pour une cadence d'enregistrement précise. Le PC embarqué garde tout de même ses fonctions de pilotage des vérins et de visualisation en direct du fonctionnement du système.

Dans la configuration au sol, le système MEDEE est accompagné d'un anémomètre sonique pour la mesure rapide du vent dans les trois directions et d'un analyseur rapide de CO_2 et H_2O (LI-7500) pour compléter les mesures de flux de COV par des mesures EC de flux de chaleur latente et de CO_2 . En avion, la mesure du vent est faite par des équipements spécifiques sur le radôme et la centrale inertielle, le système MEDEE est entièrement installé dans la baie.

4.5 Filières de post-traitement des données

Pour le traitement des données enregistrées par l'ensemble du système MEDEE et capteurs associés, j'ai développé une série de routines de calcul sous Matlab. Les routines ont évolué avec l'instrument et selon les configurations.

4.5.1 Mise en forme des données

Un premier traitement consiste à vérifier la continuité temporelle des enregistrements. Ce traitement est basé sur la datation de chaque ligne de données. La continuité temporelle des données est cruciale pour déterminer le flux dont le calcul repose sur la covariance entre deux variables. Cette étape est très importante car de nombreux sauts de lignes ont été

constatés lors de l'acquisition avec l'ordinateur embarqué et un nombre moins important mais toujours non négligeable (~ 50 lignes manquantes par jour) avec l'utilisation de la centrale d'acquisition. Une filière Matlab a été spécialement développée pour cette étape. Ce traitement consiste à rajouter des lignes de données là où elles sont manquantes et de calculer par interpolation linéaire les valeurs des variables. L'interpolation linéaire ne peut pas se substituer au signal et a été limitée arbitrairement aux sauts de 5 lignes maximum. Pour les sauts de plus de 5 lignes, les nouvelles lignes sont laissées vides.

Selon le type de communication (analogique ou numérique) entre le capteur et le système d'acquisition, certaines conversions sont appliquées pour exprimer les variables en grandeurs physiques.

Au sol, l'anémomètre sonique mesure la vitesse de l'air dans les trois directions, la vitesse du son. L'analyseur LI-7500 (LI-COR) mesure les concentrations de CO_2 et de H_2O . Pour calculer les flux, il est nécessaire d'avoir la température de l'air et les paramètres CO_2 et de H_2O sous forme de rapports de mélange. Le calcul de la température de l'air T à partir de la vitesse du son c avec la correction liée à la vapeur d'eau est le suivant :

$$T_s = \frac{c^2 M_a}{\gamma R}, \text{ et } T = T_s \times \left(\frac{1 + 1,518r}{1 + r} \right)^{-1}, \quad (4.1)$$

avec T_s la température sonique, M_a la masse molaire de l'air sec ($M_a = 28,9645 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$), $\gamma = C_p/C_v = 1,4$ le coefficient adiabatique (rapport des capacités calorifiques isobare et isochore pour l'air sec), et r le rapport de mélange de la vapeur d'eau. Le rapport de mélange r en kg kg^{-1} est calculé selon l'équation suivante :

$$r = \frac{q_a}{\rho}, \text{ et } \rho = \frac{(P - e)M_a}{RT} \quad (4.2)$$

avec q_a la concentration en vapeur d'eau (kg m^{-3}), P la pression (Pa), e la pression partielle de vapeur d'eau (Pa) et ρ la densité de l'air sec (kg m^{-3}). La pression partielle de vapeur d'eau e est calculée de la façon suivante :

$$e = \frac{P}{\frac{M_v}{rM_a} + 1}, \quad (4.3)$$

avec M_v la masse molaire de la vapeur d'eau ($M_v = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$).

Un calcul itératif, en fixant initialement un rapport de mélange de vapeur d'eau arbitraire à $0,005 \text{ kg kg}^{-1}$, a permis de corriger la température sonique des effets de la vapeur d'eau pour obtenir la température de l'air, puis calculer la densité de l'air sec et exprimer la concentration de vapeur d'eau et de CO_2 sous forme de rapport de mélange.

Une correction pour l'inclinaison de l'anémomètre sonique est ensuite appliquée selon la méthode dite "plannar fit" en suivant les recommandations de *Wilczak et al.* (2001). La correction est déterminée sur un jeu de données de plusieurs jours pour plus de précision sur l'angle de rotation. Cette correction est couramment utilisée et place le nouveau système de coordonnées selon l'écoulement moyen de telle façon que l'axe des x soit parallèle au vent horizontal moyen et l'axe des z perpendiculaire à l'axe des x . Dans ce nouveau repère, le vent vertical moyen est nul. Cette correction est particulièrement adaptée aux terrains légèrement en pente ou non-uniformes. Toutefois, elle présente certains désavantages pour des études à long-terme où l'élimination de la partie moyenne du flux ($\bar{w} = 0$) peut causer un biais sur les flux (*Lee*, 1998).

4.5.2 Datation des échantillons

La méthode DEC repose sur la capture rapide de l'échantillon et sur la covariance de la vitesse verticale de l'air au moment de la capture et la concentration de l'espèce étudiée. La datation de la capture et de l'analyse d'un échantillon sont donc primordiales. Dans cette section, nous allons voir comment les couples de mesures de vent et de rapport de mélange $w'\zeta'$ sont sélectionnés.

La capture d'un échantillon se traduit sur les enregistrements de pression dans les réservoirs par une variation brutale de pression depuis 20-40 hPa jusqu'à la pression atmosphérique c'est à dire environ 1000 hPa. Le remplissage se fait dans un temps très court allant de 0,2 s à 0,6 s selon les longueurs de tube utilisées entre la prise d'air et les réservoirs et du diamètre interne des électrovannes de prélèvement. L'instant de la capture est identifié lorsque la variation de pression entre deux valeurs consécutives est maximale. La durée de la capture est déterminée par le nombre de points compris dans la transition entre le vide et la pression atmosphérique. Les mesures de w' correspondantes à l'intervalle de temps du prélèvement sont moyennées. L'analyse de l'échantillon capturé a lieu pendant les 11,5 s suivantes mais il faut considérer un retard dû au temps de transit de l'échantillon du système de prélèvement vers l'analyseur et de la stabilisation de la mesure de l'analyseur. Le temps de transit de l'échantillon t_t peut être estimé à partir du débit volumique d'air Q et du diamètre ϕ et de la longueur L du tube reliant les deux instruments.

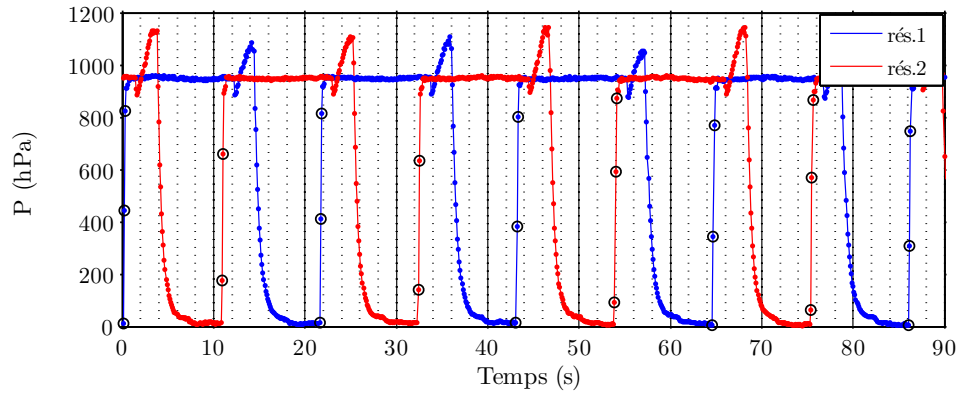
$$t_t = \frac{L \times \pi \frac{\phi^2}{4}}{Q}, \quad (4.4)$$

avec t_t en s, Q en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, puis ϕ et L en m.

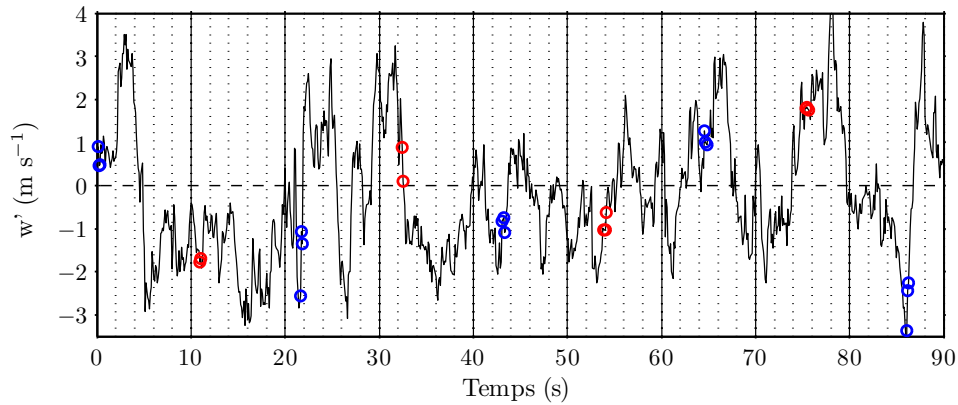
Une analyse visuelle de l'évolution de la concentration de l'espèce étudiée apporte des informations supplémentaires sur le moment d'apparition du palier correspondant à l'analyse de l'échantillon et la durée de la stabilité de la mesure. La prise en compte de cette analyse visuelle permet d'affiner la sélection des points. La figure 4.14 illustre cette approche. On a ici représenté les pressions dans chaque réservoir en fonction du temps (fig.4.14a) avec les points correspondant à l'instant de la capture entourés de noir. Sur la figure 4.14c, sont représentées les concentrations de vapeur d'eau sur la même période.

Différents niveaux de concentration sont observables et témoignent de l'analyse successive des échantillons. Les points colorés de bleu ou de rouge selon le réservoir, correspondent aux points sélectionnés pour caractériser chaque échantillon. Le remplissage du réservoir lors de la capture d'un échantillon étant quasi linéaire, la moyenne des mesures de w correspondant à l'instant de la capture seront associés à la moyenne des concentrations sélectionnées pour l'échantillon (illustré dans la figure 4.14b). Ces couples seront utilisés pour calculer les flux DEC.

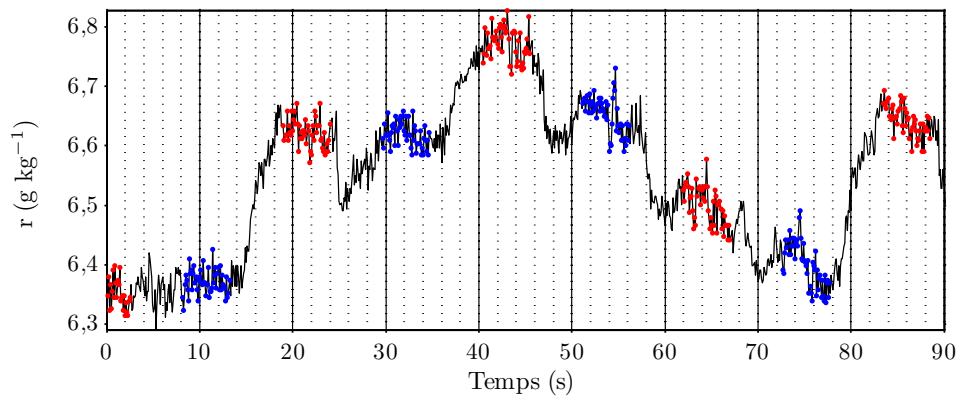
Avant le calcul de covariance, un filtre est appliqué aux séries temporelles afin de supprimer la tendance et permet de ne garder que la partie turbulente du signal. La soustraction simple de la moyenne sur la période de calcul ne suffit généralement pas à supprimer les basses fréquences présentes dans le signal (Aubinet et al., 2000). Ces basses fréquences peuvent être le résultat d'une dérive de l'analyseur ou bien d'un changement de situation météorologique à l'échelle synoptique. Elles ne sont pas liées à la turbulence et il est donc préférable de les supprimer du signal avec le calcul de covariance. Il existe deux méthodes de filtrage qui sont le "detrending" (soustraction de la tendance linéaire)



(a) Identifications des moments correspondant à la capture d'un échantillon. Les pressions dans les réservoirs 1 et 2 sont représentées en bleu et rouge respectivement. Les points cerclés de noir sont ceux correspondant au moment de la capture tels que sélectionnés par l'algorithme.



(b) Vitesse verticale de l'air (w') avec entourés de bleu ou de rouge les points correspondant aux instants de capture des échantillons.



(c) Rapport de mélange de vapeur d'eau avec en couleur les points sélectionnés pour caractériser chaque échantillon.

FIGURE 4.14 – Sélection des moments de capture d'échantillon. Exemple tiré des mesures lors de la campagne aéroportée TRAQA, juin 2012.

et l'application d'un filtre récursif. Ces différentes méthodes ont été comparées par *Rannik and Vesala* (1999). Ici, un filtrage par detrending a été utilisé plutôt qu'un filtrage récursif car ce dernier est susceptible de supprimer certaines fréquences contribuant au flux si sa constante de temps est mal définie. Un exemple de ce traitement sur le rapport de mélange de vapeur d'eau est illustré par la figure 4.15.

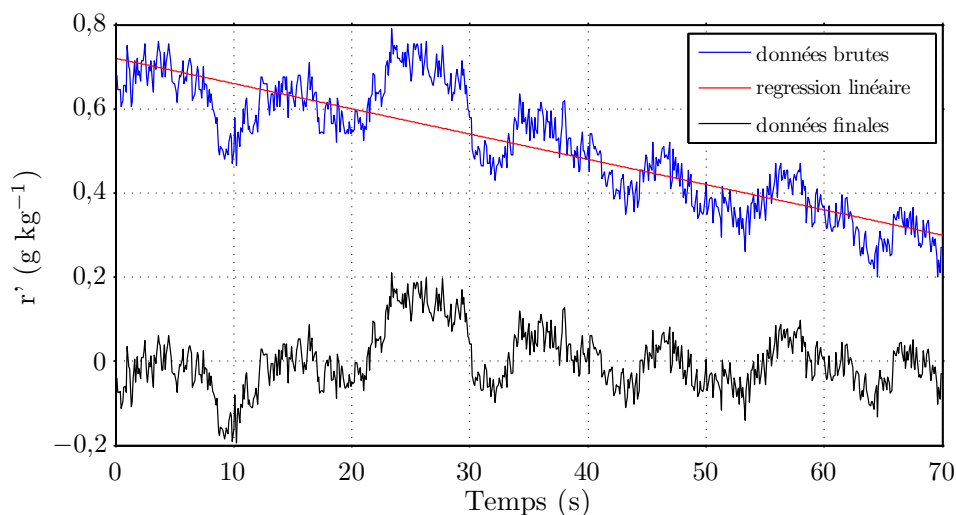


FIGURE 4.15 — Exemple de filtre de type "detrending" qui supprime la tendance, ici sur la mesure du rapport de mélange de vapeur d'eau.

4.6 Conclusion

La conception et la réalisation de l'instrument MEDEE ont été menées à bien grâce à un travail de collaboration entre l'équipe scientifique et les équipes d'ingénierie. La solution technologique développée a été choisie après l'élaboration d'un cahier des charges exhaustif et d'une étude de plusieurs préconcepts. Elle est basée sur un système de deux réservoirs dont le volume est contrôlé par un piston actionné par un vérin électrique. Deux modules de prélèvement, équivalents à des seringues mécaniques, fonctionnent en alternance pour prélever les échantillons et ainsi alimenter de manière continue l'analyseur connecté en ligne au système. Une partie contrôle/commande orchestre l'ouverture des électrovannes lors des phases de capture, d'analyse et de vidange. Elle assure aussi le maintien d'une pression constante dans les réservoirs pendant le transfert de l'échantillon vers l'analyseur. Le maintien de la pression est garanti par un régulateur PID qui positionne le piston dans le réservoir en fonction de la pression. Le système a été réalisé pour répondre aux contraintes les plus fortes qui correspondent à une utilisation en avion du système. Les données du système sont enregistrées sur une centrale d'acquisition. Le traitement des données se fait a posteriori grâce à des filières de calcul développées spécifiquement. Ces filières permettent de dater précisément chaque échantillon à partir des séries temporelles de pression dans les réservoirs et de sélectionner les périodes d'analyse correspondantes.

Malgré d'importantes études en amont de la réalisation, certains problèmes (temps de capture) n'ont pas pu être anticipés mais des adaptations ont permis d'apporter des solutions convenables. Le fonctionnement de l'instrument correspond aux attentes et peut être mis en œuvre pour la mesure de flux par la méthode DEC.

Chapitre 5

Validation de MEDEE

5.1 Introduction

Deux campagnes de mesures dédiées uniquement à la validation de MEDEE ont été mises en place durant l'été 2011 et l'été 2012. La première a eu lieu au sol, sur le site de Lamasquère près de Toulouse, la seconde a eu lieu pendant la campagne aéroportée TRAQA (TRANsport à longue distance et Qualité de l'Air) dans le sud de la France.

5.2 Validation de l'instrument MEDEE au sol

La campagne de validation au sol a eu lieu du 9 au 17 juin 2011 à Lamasquère (Haute Garonne). Durant cette période les flux de CO_2 et de chaleur latente ont été mesurés simultanément par la méthode de référence EC et par la méthode DEC avec le système MEDEE. La comparaison des résultats des deux systèmes permet de caractériser l'instrument MEDEE dans sa configuration au sol.

5.2.1 Le site de mesures, Lamasquère



FIGURE 5.1 – *Photo illustrant le site expérimental de la campagne de mesures de Lamasquère.*

Le site de Lamasquère, situé à quelques dizaines de kilomètres au sud-ouest de Toulouse, se caractérise par une parcelle cultivée de 0.32 km^2 et appartient au domaine de Lamothe qui est une ferme expérimentale de l'ESAP (École Supérieure d'Agronomie de

Purpan). Cette parcelle est située en bordure de la rivière du Touch, à une altitude de 180 m. Le terrain est parfaitement plat. Ce site est instrumenté par une équipe de recherche du Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO) depuis mars 2005 pour des mesures météorologiques et micro-météorologiques et fait partie du réseau européen CarboEurope-IP (*Dolman et al.*, 2006). La figure 5.1 illustre la station de mesure des flux sur le site. Les flux de CO_2 et de H_2O y sont mesurés de manière continue. Les principales directions du vent sont ouest et sud-ouest avec une moyenne annuelle de 1.79 m s^{-1} . La distance qui sépare la station de la limite de la parcelle cultivée dans ces deux directions est de 200 et 140 m respectivement. Le type de culture suit une rotation de triticale/maïs/blé/maïs. Une description détaillée du site est donnée par *Béziat et al.* (2009).

Pendant la campagne, le type de culture sur le site était le triticale ou blé d'hiver (*Triticum aestivum*). Le mât de mesure a été installé au centre de la parcelle de façon à optimiser les zones d'échanges surface-atmosphère appréhendées par le système de mesure selon les vents dominants. La température moyenne de l'air pendant la période de la campagne était de $18,5^\circ\text{C}$. Les températures les plus chaudes ont été mesurées le 15 juin avec un maximum à 29°C atteint en début d'après-midi. Les conditions météorologiques étaient bonnes, dominées par des journées ensoleillées. Seules les journées du 10 et 16 juin ont été nuageuses avec quelques averses peu intenses et courtes.

La campagne s'est déroulée pendant la phase de sénescence du triticale, c'est à dire lorsque la plante perd son activité photosynthétique et se dessèche. La capture de CO_2 ainsi que l'évapotranspiration par les plantes étant fortement diminuées pendant cette phase de développement du triticale, on peut s'attendre à des flux de CO_2 et de vapeur d'eau faibles. La moisson du triticale a eu lieu le 2 juillet, deux semaines après la fin des mesures.

5.2.2 Dispositif expérimental

La station déjà présente sur le site possède un système de mesure dédié à la méthode EC. Ce système est composé d'un anémomètre sonique (CSAT 3, Campbell Scientific Inc, Logan, UT, USA), pour la mesure rapide du vent dans les trois directions et de la température puis d'un analyseur rapide de CO_2 et H_2O (LI-7500, LI-COR, Lincoln, NE, USA). L'utilisation du couple CSAT-3 et LI-7500 constitue une référence pour les mesures de flux par EC d'après les recommandations faites par les réseaux d'observations européens Euroflux (*Aubinet et al.*, 2000) ou Carbo-europe (*Dolman et al.*, 2006). Ces deux systèmes sont placés sur un mât à 3,65 m au-dessus du sol.

Pour les mesures par DEC, le système MEDEE est installé à une hauteur de 1,5 m près du mât avec un déport du boîtier contenant les électrovannes de prélèvement. Ce boîtier est placé en haut du mât au niveau de l'anémomètre sonique. Deux tubes en Teflon de 9,6 mm de diamètre intérieur et de 2 m de long relient les réservoirs aux électrovannes de prélèvement. Pour la prise d'échantillon, deux tubes de même diamètre et de 60 cm de long sont connectés à chaque électrovanne de prélèvement et sont positionnés pour permettre la capture d'air à environ 20 cm de la mesure de vent de l'anémomètre (figure 5.2). Des filtres ont été installés à chaque extrémité des tubes de prélèvement pour éviter l'aspiration d'insectes ou de poussières lors du prélèvement. L'analyse des échantillons capturés par MEDEE se fait grâce à un analyseur de CO_2 et H_2O connecté en ligne à MEDEE (LI-6262, LI-COR, Lincoln, NE, USA). L'analyseur est installé dans un abri au pied du système de prélèvement pour minimiser les longueurs de tube entre les réservoirs

et l'analyseur. L'ensemble des signaux de MEDEE, de l'analyseur LI-6262 et des signaux du système EC sont enregistrés sur la centrale d'acquisition de MEDEE à une fréquence de 10 Hz. Un schéma de l'ensemble des dispositifs EC et DEC est présenté dans la figure 5.3.



FIGURE 5.2 – Mât de mesures sur le site de Lamasquère avec l'anémomètre sonique, l'analyseur de CO_2 et H_2O (LI-7500) ainsi que le boîtier des électrovannes de prélèvement de MEDEE et les lignes de prise d'échantillon.

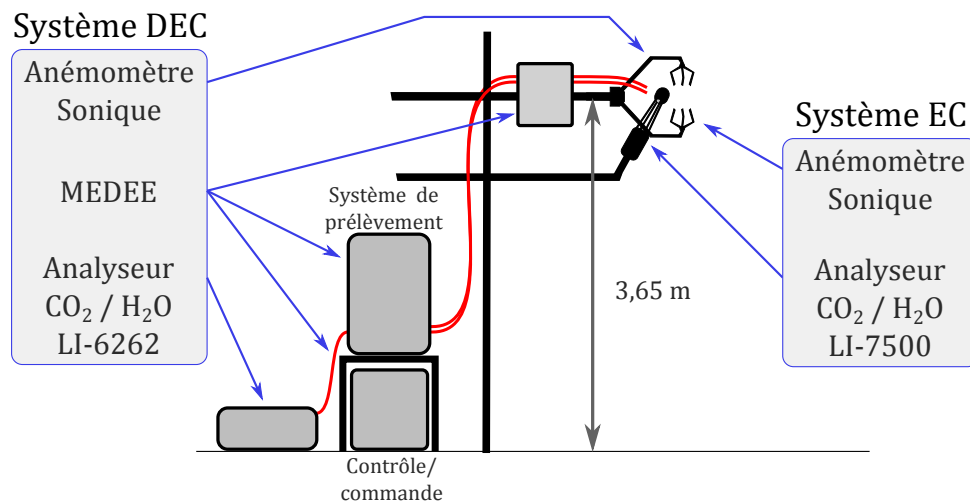


FIGURE 5.3 – Schéma des systèmes EC et DEC durant la campagne de mesures de Lamasquère. L'anémomètre sonique est commun aux deux dispositifs.

Dans cette configuration le volume mort dans les tubes de prélèvement (43 ml) en amont des électrovannes de prélèvement est estimé à 2,4 % du volume total prélevé. Le déport des électrovannes et donc l'allongement des longueurs de tube séparant la prise d'air du réservoir engendre une légère perte de rapidité de la capture de l'échantillon. Le remplissage des réservoirs est quasi linéaire pendant la capture et dure $\sim 0,3$ s.

5.2.3 Traitement des données

Les échantillons sont précisément datés à partir des séries temporelles de pression dans les réservoirs comme décrit dans la section 4.5.2. Le remplissage des réservoirs étant quasi linéaire pendant la période de capture, les mesures de vent vertical correspondant au moment du prélèvement sont moyennées sur la durée de la capture et associées aux mesures

de concentration en CO_2 et H_2O de l'échantillon. La figure 5.4 montre un exemple des mesures par les deux systèmes sur une période de 30 mn. On peut remarquer sur la figure que le signal du LI-6262 est crénelé ce qui correspond à la succession des phases d'analyse de 10 secondes. Les variations lentes de concentration sont toutefois bien reproduites par le système DEC.

Les mesures de rapport de mélange de l'échantillon sont moyennées sur une période de 6 s durant la phase d'analyse de MEDEE. La figure 5.5 est un aperçu sur une période de 2 mn de la figure 5.4 et illustre la sélection des points pour le calcul du rapport de mélange moyen d'un échantillon. Les 6 premières secondes de la phase d'analyse sont défaussées pour prendre en compte le temps de transit de l'échantillon du réservoir vers l'analyseur. En effet le volume de tuyau qui sépare les réservoirs de MEDEE et l'analyseur contient en fait un résidu de l'échantillon précédent et il faut donc prendre en compte le transit de cet air dans l'analyseur. Une fois les couples de valeurs de vent vertical et de rapport de mélange identifiés pour la DEC, les flux sont calculés par demi-heure selon l'équation 2.41. Aucune correction pour l'orientation de l'anémomètre n'a été utilisée ici car les deux systèmes partagent le même anémomètre sonique et la signification physique des flux ne présente pas d'intérêt majeur pour la comparaison.

Pour éviter que la comparaison des flux DEC avec les flux EC ne soit faussée par une différence de calibration entre les analyseurs de chaque système une correction a été appliquée. Pendant la campagne de mesure, une période de 45 mn a été dédiée à la comparaison directe des mesures de concentration des analyseurs des deux systèmes (figure 5.6). Ces mesures ont permis de déterminer les différences de calibration entre ces deux analyseurs. Ce sont uniquement les fluctuations de rapport de mélange qui ont un impact sur le flux et pour déterminer la différence de réponse aux fluctuations des deux analyseurs il est nécessaire de comparer les écart-types de chaque série de données. Pour la mesure de la vapeur d'eau le rapport des écart-types est de 0,99 et indique un accord entre les mesures de 99%. Pour le CO_2 , ce rapport est de 0,77 et montre un désaccord entre les analyseurs. Dans notre cas, ce rapport signifie que l'analyseur LI-6262 mesure des fluctuations 23% plus fortes que l'analyseur LI-7500. Une correction est donc appliquée sur les mesures de concentration de l'analyseur couplé à MEDEE avant le calcul des flux.

La validation au sol de l'instrument MEDEE est divisée en deux étapes. D'abord les flux EC sont comparés avec les flux calculés par une simulation de la DEC à partir des mesures du système EC. Cette première comparaison théorique permet de valider la méthode DEC et de montrer ses performances dans les conditions de la campagne et avec des caractéristiques similaires au système MEDEE (même nombre d'échantillons et temps de capture). La seconde étape consiste à comparer les flux par EC et les flux par DEC avec le système MEDEE. Elle sert de validation des résultats de la DEC avec le système MEDEE. Ces deux comparaisons permettent de caractériser MEDEE en montrant les performances de la DEC de manière théorique (simulation de la DEC) et les performances de la méthode DEC avec le système MEDEE.

La simulation de la DEC consiste à appliquer en post-traitement un sous-échantillonnage sur les séries temporelles de w et des rapports de mélange (CO_2 et H_2O) mesurées à 10 Hz par le système EC. Le sous-échantillonnage est effectué de manière à reproduire le fonctionnement du système MEDEE. Chaque échantillon correspond à une moyenne des valeurs de w' et χ' sur une période de 0,3 s, équivalente au temps de capture avec MEDEE. L'intervalle de temps entre deux échantillons est de $\Delta t = 11,5$ s et correspond à la période d'analyse du système MEDEE. A partir des couples de valeurs obtenus le

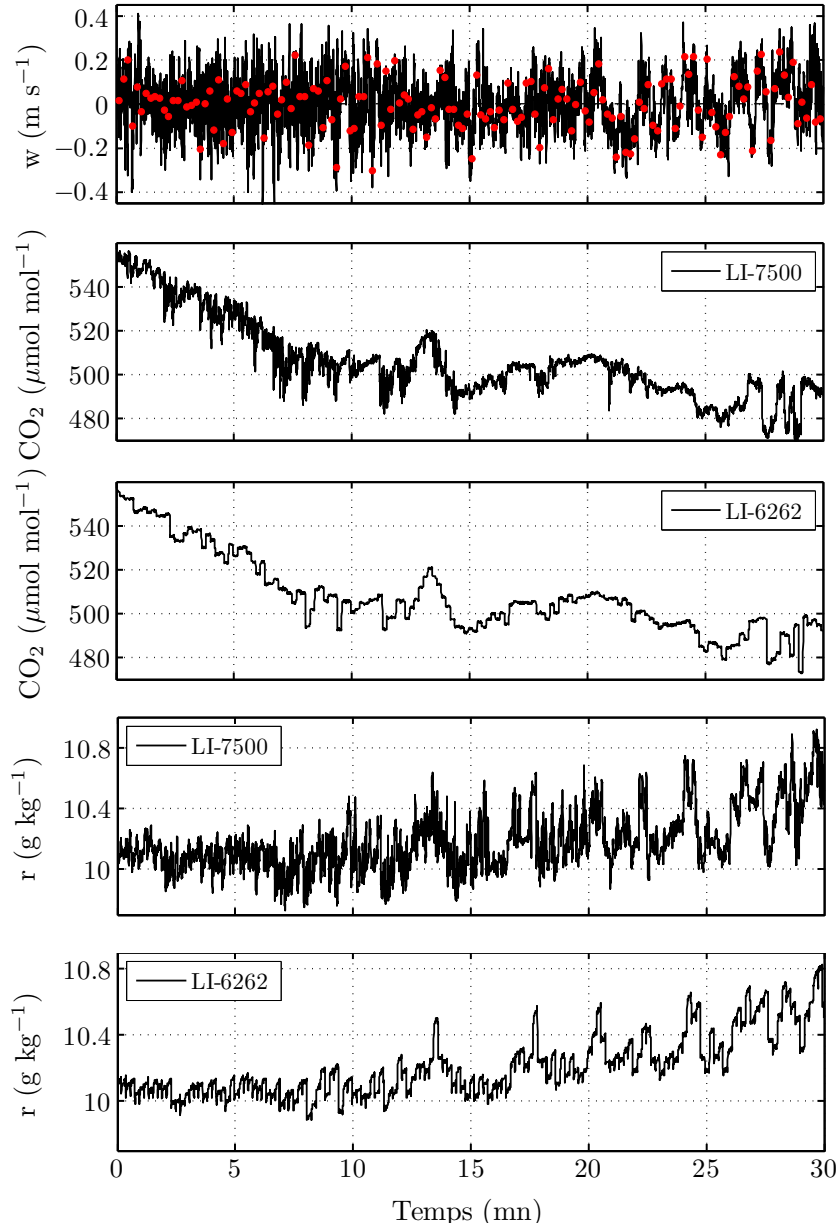


FIGURE 5.4 — De haut en bas : séries temporelles sur 30 mn de $w \text{ (m s}^{-1}\text{)}$, du rapport de mélange de CO_2 mesuré par le LI-7500 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), du rapport de mélange de CO_2 mesuré par le LI-6262 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), du rapport de mélange de H_2O mesuré par le LI-7500 (g kg^{-1}) et du rapport de mélange de H_2O mesuré par le LI-6262 (g kg^{-1}). Les points rouges indiquent les valeurs du w moyen pendant la période de capture des échantillons de la DEC.

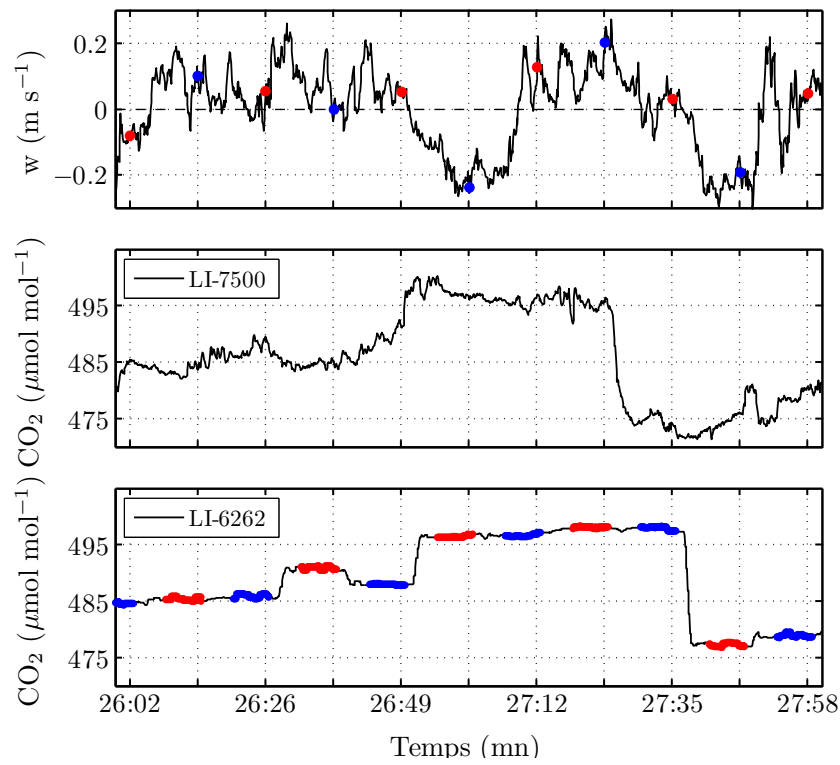


FIGURE 5.5 – Les graphiques de la figure 5.4 sont repris sur 2 mn d’enregistrement et uniquement pour le CO_2 . Les points en couleur sur la mesure du CO_2 par le LI-6262 indiquent les points sélectionnés pour le calcul du rapport de mélange de l’échantillon. Les couleurs rouge et bleue font référence aux deux réservoirs du système MEDEE.

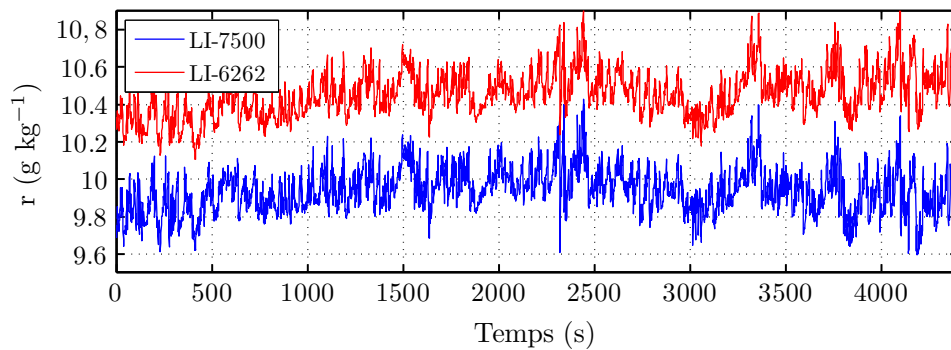


FIGURE 5.6 – Comparaison des mesures de rapport de mélange de vapeur d’eau par le LI-7500 et le LI-6262. Les données ont été moyennées à la seconde.

flux DEC simulé peut être calculé. La comparaison des flux par EC et des flux par DEC simulée constitue une évaluation théorique de la méthode DEC puisque les deux flux sont calculés à partir du même jeu de données initial.

5.2.4 Comparaison des flux EC avec les flux DEC simulée

Les figures 5.7 et 5.8 présentent respectivement les flux de CO_2 et de chaleur latente (LE) calculés par EC et DEC simulée pour la journée du 15 juin 2011. La faible amplitude des flux est à souligner. Les flux de chaleur latente ne dépassent pas 110 W m^{-2} en milieu de journée. Ces valeurs sont 3 à 4 fois plus faibles que ce qui est observé au-dessus de ce type de culture au printemps lorsque la végétation est plus active. De manière similaire, les flux de CO_2 sont faibles et ne présentent pas de cycle diurne marqué, ce qui témoigne de l'absence d'activité photosynthétique du blé en phase de sénescence. Sur ce même site et avec le même type de culture, une étude réalisée par *Béziat et al.* (2009) montre des changements importants d'assimilation de CO_2 tout au long de la saison. Par exemple, en avril et mai, des valeurs journalières de production primaire atteignant les -10 à $-15 \text{ gC m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ soit $-9,5$ à $-14,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ont été mesurées (en considérant que $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \approx 1.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$). De ces valeurs journalières moyennes on peut déduire qu'en milieu de journée, la production primaire peut être de l'ordre de -30 à $-45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à ces périodes là. Malgré les faibles valeurs de flux mesurées durant notre campagne, les deux méthodes présentent des variations similaires. Cependant quelques désaccords sont observables entre les flux EC et les flux DEC simulée. L'écart entre les deux méthodes est plus important pour les flux de CO_2 que pour ceux de chaleur latente.

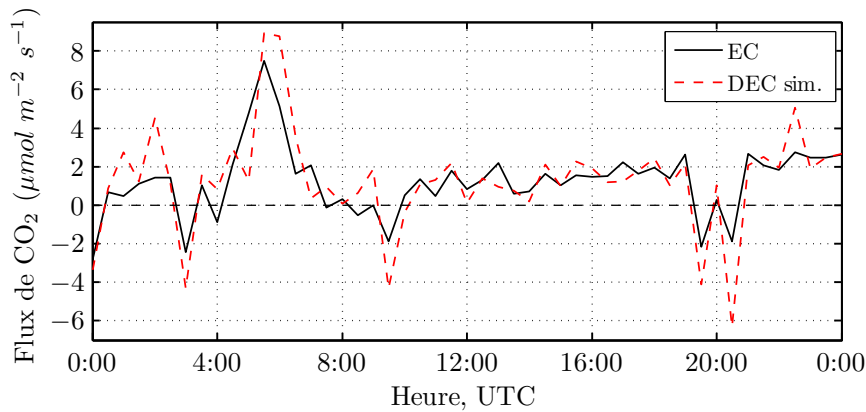


FIGURE 5.7 – Flux de CO_2 calculés par EC et DEC simulée pour la journée du 15 juin 2011.

La comparaison de l'ensemble des flux mesurés sur toute la période est présentée en diagramme de dispersion dans les figures 5.9 et 5.10. La régression linéaire a été calculée pour chaque graphique et la droite 1 : 1 est tracée. Pour les flux de CO_2 , la pente est de 1,01 avec une erreur standard de $\pm 0,04$ et un offset de $-0,17 \pm 0,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Le coefficient de détermination obtenu est $R^2 = 0,69$. La corrélation certes significative n'est pas aussi bonne que ce que l'on peut espérer pour une comparaison de deux techniques. Ce résultat est en grande partie lié aux conditions de la campagne. En effet comme l'illustre bien la figure 5.9, les valeurs de flux de CO_2 sont très faibles et proches de zéro. Cette accumulation de valeurs sur une même zone du graphique dégrade la corrélation et augmente l'incertitude sur la droite de régression. De plus, l'incertitude sur l'estimation

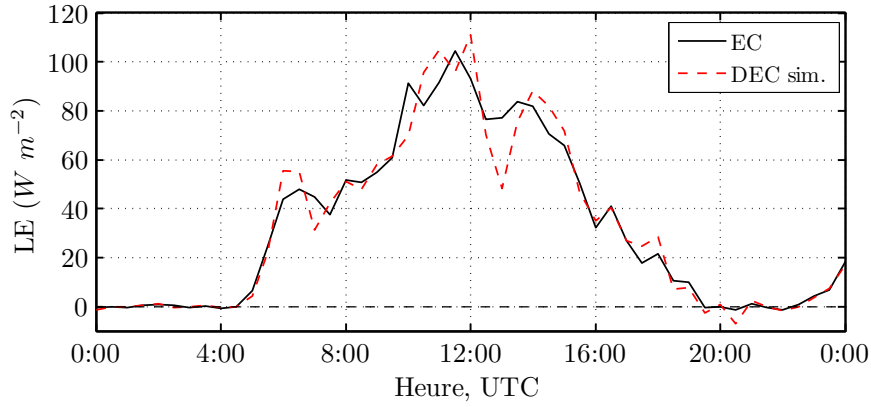


FIGURE 5.8 – Flux de chaleur latente (LE) calculés par EC et DEC simulée pour la journée du 15 juin 2011.

du flux par EC et de la même façon par DEC est d'autant plus grande que le flux est faible.

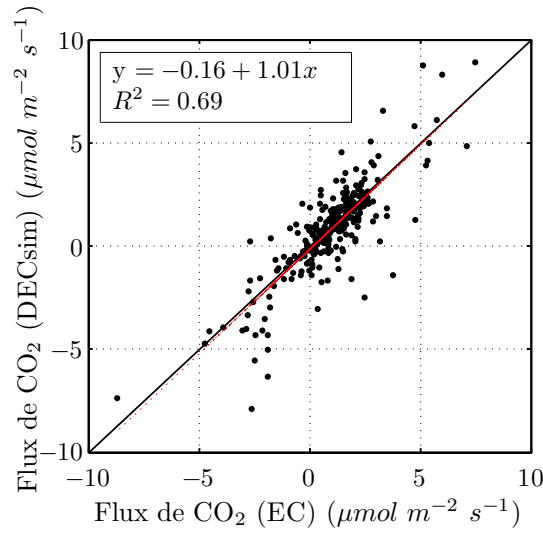


FIGURE 5.9 – Comparaison des flux de CO_2 calculés par DEC simulée et par EC , pour l'ensemble de la campagne de mesures (du 9 au 17 juin 2011).

Pour les flux de chaleur latente (figure 5.10), la régression linéaire donne une pente de $0,99 \pm 0,02$ et un offset de $-0,32 \pm 0,85 \text{ W m}^{-2}$. Dans ce cas également la pente de la régression linéaire est très proche de 1 et l'offset négligeable ce qui signifie que la méthode DEC n'introduit pas de biais sur le calcul des flux. Ce résultat important permet de montrer que le temps de capture des échantillons est suffisamment court pour retranscrire la partie du flux appartenant aux hautes fréquences.

La comparaison des flux mesurés par EC et par DEC simulée nous indique la performance que l'on peut espérer obtenir pour les mesures par DEC avec le système MEDEE.

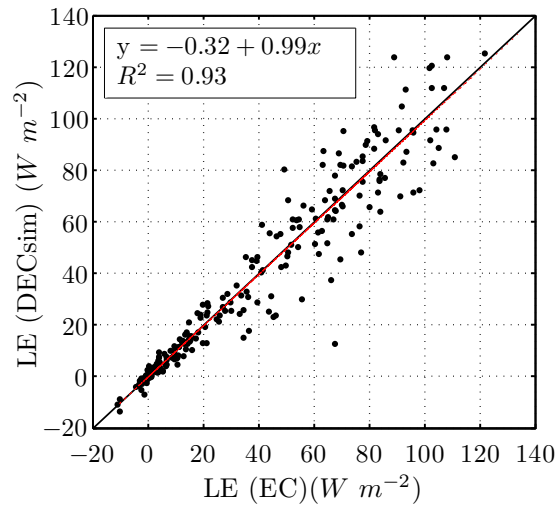


FIGURE 5.10 – Comparaison des flux de chaleur latente (LE) calculés par DEC simulée et par EC, pour l'ensemble de la campagne de mesures (du 9 au 17 juin 2011).

5.2.5 Comparaison des flux EC avec les flux DEC

De manière similaire à la comparaison précédente, les figures 5.11 et 5.12 montrent les flux mesurés pour la journée du 15 juin 2011 avec cette fois-ci les flux EC et les flux DEC avec le système MEDEE. L'évolution diurne des flux de chaleur latente mesurés en EC est bien reproduite par les mesures DEC. Pour les flux de CO_2 , la tendance générale est reproduite par les mesures DEC avec des désaccords sur certains points. On remarque que les points pour lesquels la différence entre les deux méthodes est grande sont les mêmes que ceux identifiés lors de la comparaison avec la DEC simulée (figures 5.7 et 5.8). Ce constat généralisable à l'ensemble des données montre que ce désaccord n'est pas lié à l'instrument MEDEE mais à la méthode DEC et que l'analyseur connecté à MEDEE observe bien les mêmes variations de concentrations de CO_2 que l'analyseur du système EC.

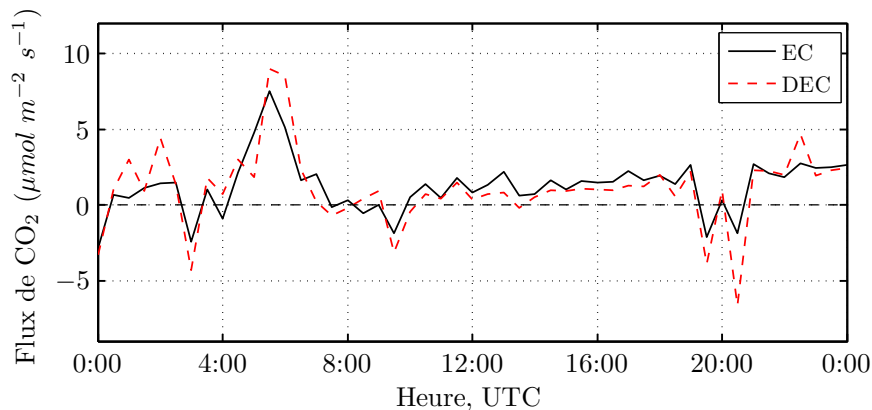


FIGURE 5.11 – Flux de CO_2 calculés par EC et DEC pour la journée du 15 juin 2011.

La comparaison des flux sur l'ensemble de la campagne de mesure est donnée par les figures 5.13 et 5.14. Les coefficients de détermination sont $R^2 = 0,69$ et $R^2 = 0,91$ pour les flux de CO_2 et de chaleur latente respectivement. Malgré le fait que deux analyseurs

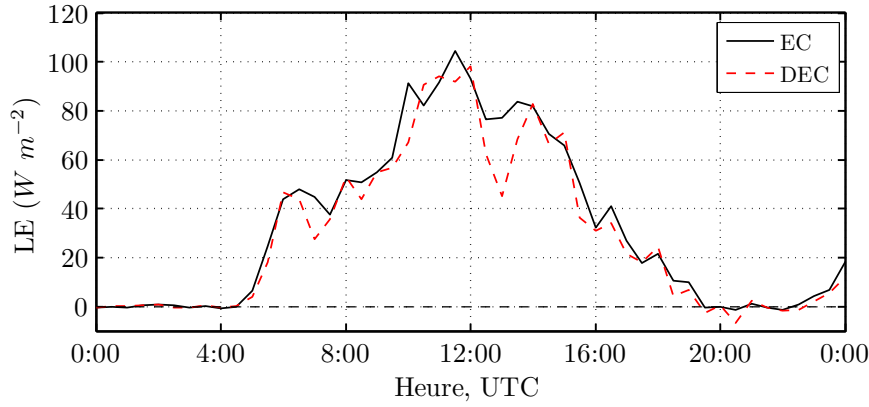


FIGURE 5.12 – Flux de chaleur latente (LE) calculés par EC et DEC pour la journée du 15 juin 2011.

différents soient utilisés les coefficients de détermination sont très similaires à ceux obtenus lors de la comparaison de la DEC simulée avec l' EC .

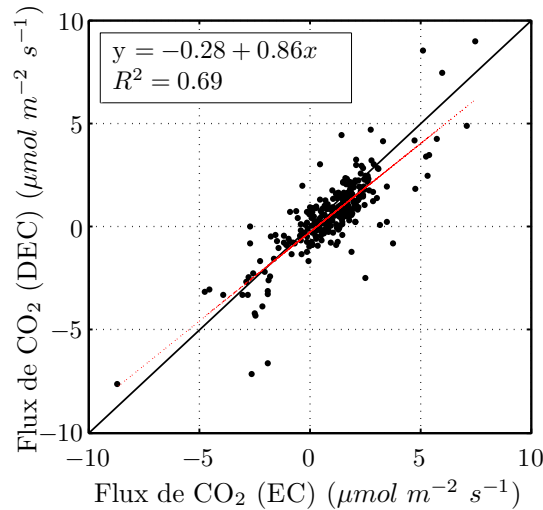


FIGURE 5.13 – Comparaison des flux de CO_2 calculés par DEC et par EC , pour l'ensemble de la campagne de mesures (du 9 au 17 juin 2011).

La régression linéaire indique une pente de $0,86 \pm 0,04$ et un offset de $-0,28 \pm 0,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour la comparaison des flux de CO_2 . Pour les flux de chaleur latente, la régression linéaire indique une pente de $0,86 \pm 0,02$ et un offset de $-1,19 \pm 0,80 \text{ W m}^{-2}$. On constate que les offsets sont proches de zéro pour les deux composés alors que la pente des régressions linéaires est de 0,86 dans les deux cas. Ceci montre que les flux DEC sont systématiquement et en moyenne sous estimés de 14 % par rapport aux flux EC .

Plusieurs raisons peuvent être évoquées pour expliquer l'origine d'un biais sur la mesure des flux. Étant donné les conditions de flux faibles pendant la campagne de mesures la limite de sensibilité de l'analyseur LI-6262 pour des faibles différences de concentration entre deux échantillons peut être en cause dans cet effet de sous-estimation des flux. En effet les performances des deux analyseurs peuvent être différentes sur des faibles variations de concentrations. D'autres mesures sont nécessaires dans des conditions de flux forts pour déterminer si la limite de sensibilité de l'analyseur est à l'origine de cette

sous-estimation.

L'utilisation d'un système de prélèvement avec des réservoirs intermédiaires implique qu'une fraction de l'échantillon précédent peut contaminer l'échantillon actuel. Cet effet est d'autant plus important que la pression résiduelle entre deux captures est élevée. Le système MEDEE produit un vide inférieur à 40hPa dans le réservoir avant la capture de l'échantillon. Ce vide est relativement poussé pour un tel système et les restes de l'échantillon précédent sont considérés comme négligeables en première approche. Une correction proposée par *Langford et al.* (2009) et donnée à la section 2.4.6 a toutefois permis d'estimer cet effet dans notre configuration. Il en résulte une sous-estimation de 2,5 % pour les flux de CO₂ et de 2 % pour les flux de vapeur d'eau. Ce phénomène contribue bien au biais observé sur la comparaison mais n'explique pas la sous-estimation de 14 %.

Les tubes utilisés comme prise d'air en amont des électrovannes de prélèvement constituent un volume mort où l'air stagne entre deux captures d'échantillons. Ce volume d'air est aspiré lors de la capture et contamine l'échantillon. Ce phénomène peut également entraîner un biais sur le calcul du flux, analogue à celui créé par les restes d'échantillon dans le réservoir. Le volume mort dans les tubes de la prise d'air représente 2,4 % du volume prélevé ce qui est proche du volume restant de l'échantillon précédent. On peut donc supposer que le biais engendré sera du même ordre de grandeur.

D'autre part, un effet d'atténuation des fluctuations du rapport de mélange peut avoir lieu lorsque l'échantillon transite par un tube. Ici, la longueur de tube est courte (60 cm) et le diamètre de 9,6 mm est relativement grand. Les effets d'atténuation seront donc très limités, de plus le caractère turbulent de l'écoulement lors du prélèvement peut diminuer aussi l'effet d'atténuation (*Leuning and King*, 1992).

La condensation de vapeur d'eau dans le circuit emprunté par l'échantillon (tubes et réservoir) peut modifier les propriétés de l'échantillon et avoir une conséquence sur le calcul du flux. Cependant le fonctionnement des électrovannes ainsi que le mouvement des pistons dans les réservoirs dégagent de la chaleur. Cette chaleur permet de maintenir la température des surfaces en contact avec l'échantillon supérieure à la température extérieure de quelques degrés et de minimiser la condensation potentielle.

Des phénomènes d'adsorption et de désorption sur les surfaces peuvent aussi entraîner un léger biais sur le calcul du flux. Cet effet est faible pour les espèces passives mais peut être important pour la vapeur d'eau (*Lenschow and Raupach*, 1991; *Massman and Ibrom*, 2008). Il est difficile à quantifier surtout pour un système de prélèvement complexe.

La comparaison des deux techniques montre que les flux mesurés par DEC avec le système MEDEE sont fortement corrélés avec les flux mesurés par EC. Une légère sous-estimation des flux a cependant été observée pour les flux de CO₂ et de chaleur latente. On peut aussi noter que la DEC a montré des résultats très similaire à la DEC simulée en terme de corrélation. Des conditions plus favorables avec des flux plus importants pourront servir de complément à la validation de l'instrument pour déterminer l'origine de la sous-estimation observée.

5.3 Validation de la version aéroportée de MEDEE

La campagne TRAQA (TRANsport à longue distance et Qualité de l'Air) constitue une première étape du projet *ChArMEx* (Chemistry-Aerosol Mediterranean eXperiment). Elle s'est déroulée pendant l'été 2012, du 11 juin au 08 juillet au-dessus de la Méditerranée.

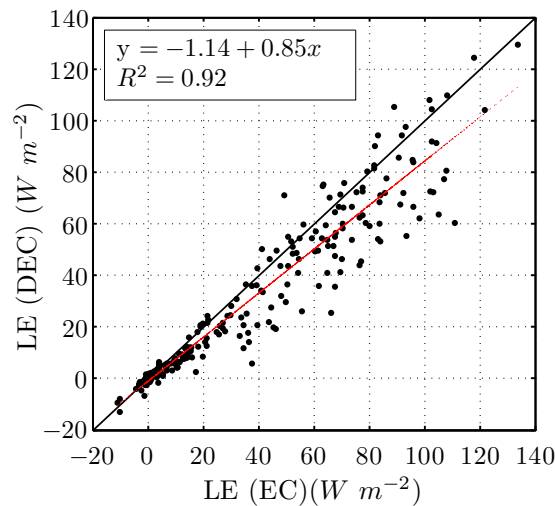


FIGURE 5.14 – Comparaison des flux de chaleur latente (LE) calculés par DEC et par EC, pour l'ensemble de la campagne de mesures (du 9 au 17 juin 2011).

Les objectifs de TRAQA sont de documenter la zone méditerranéenne afin de caractériser l'impact du transport à longue distance sur la pollution et la qualité de l'air.

Cette campagne a été une opportunité pour notre équipe de tester la version aéroportée de MEDEE pour préparer la campagne *ChArMEx* où les mesures avion des émissions de COV biogéniques font parties des objectifs. Durant la campagne TRAQA, plusieurs périodes de vol ont été dédiées à l'instrument MEDEE et ont permis de comparer les mesures de flux de chaleur latente par EC déjà opérationnelles sur l'avion avec les mesures de flux par DEC via MEDEE.

D'autre part, un couplage de MEDEE avec un analyseur PTR-MS a aussi pu être testé sur plusieurs vols. Cet analyseur appartient à l'Institut Pierre Simon Laplace, qui représente un groupement de 6 laboratoires de recherche sur l'environnement. Cet instrument est installé dans l'avion pour mesurer les concentrations de COV dans l'atmosphère. Couplé au système MEDEE, il permet de mesurer les flux de plusieurs composés (isoprène, monoterpènes, benzène...). Pour la campagne aéroportée de *ChArMEx*, il est prévu d'utiliser ce couplage pour la mesure de flux de COV biogéniques. Les données du PTR-MS recueillies pendant la campagne TRAQA ne sont pas encore disponibles.

Dans cette partie la validation de la version aéroportée de MEDEE est faite à travers la comparaison des mesures de flux de chaleur latente par la méthode DEC et par la méthode EC.

5.3.1 La campagne TRAQA, dispositif expérimental

Les moyens mis en œuvre pendant la campagne sont un avion instrumenté pour la recherche par l'unité SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) et plusieurs ballons plafonnants de type BPCL qui évoluent à basse altitude. Le principe est de lâcher les ballons depuis la côte dans une région qui présente de fortes émissions de polluants (en l'occurrence ici la région de Fos-sur-Mer) et de mesurer à l'aide des instruments embarqués sur ballon, l'évolution de la concentration en ozone et des paramètres physiques de la masse d'air au cours de son vieillissement (Attié, 2012). Les ballons BPCL sont de bons traceurs des vents troposphériques, c'est à dire qu'ils vont se

déplacer en suivant le vent et ainsi dévoiler la trajectoire de la masse d'air dans laquelle ils évoluent. L'avion de recherche est équipé pour la mesure de nombreux paramètres physiques et chimiques de l'air. Son plan de vol va être ajusté afin de voler de façon à traverser la masse d'air perpendiculairement à la trajectoire du ballon au fur et à mesure que la masse d'air se déplace. Les lâchers de ballons sont effectués lorsque les conditions sont optimales. L'alerte météorologique est déclenchée pour des conditions anticycloniques avec mistral modéré et donc un transport des masses d'air polluées vers la mer.

L'équipe SAFIRE gère trois avions dédiés à la recherche. Le Falcon 20 (Dassault Falcon 20 GF, modifié) est un avion à réaction qui permet de voler à des altitudes élevées en haute troposphère voire basse stratosphère (plafond : 12 km). Ensuite, le Piper-Aztec, un bi-moteur à piston non pressurisé, est idéal pour les mesures en basse couche de pollution urbaine, chimie de l'air et turbulence. Le troisième avion est un ATR-42-320, bi turbo-propulseur de 22,67 m de long et de 24,57 m d'envergure qui peut emporter jusqu'à 2500 kg d'équipement scientifique et de scientifiques. Capable de voler jusqu'à 7500 m d'altitude à une vitesse de croisière de 100 m s^{-1} , cet avion est utilisé pour les mesures de chimie, microphysique, télédétection, turbulence en moyenne troposphère mais aussi en basse troposphère. Il a été modifié pour pouvoir accueillir une multitude de capteurs et de sondes sur différentes parties du fuselage (nez, ailes, cabine) et peut fournir une puissance électrique de 20 kVA en vol. C'est ce dernier qui a été utilisé pour la campagne TRAQA car il constitue un outil idéal pour embarquer de nombreux instruments et explorer la couche limite et la moyenne troposphère. En plus des capteurs et sondes installés de manière permanente, les instruments suivants : Lidar LNG (DT INSU, LATMOS), Avirad (LISA), PTR-MS (LISA), et MEDEE (LA) ont été embarqués dans l'ATR-42 pendant TRAQA. Nous décrirons en détail ici uniquement les instruments qui ont servi à la validation du système MEDEE.

La température est mesurée près du nez de l'avion par un fil de platine de $30 \mu\text{m}$ de diamètre protégé du flux d'air par un habitacle conçu pour réduire à zéro la vitesse de l'air en contact avec le fil (E102AL Rosemount). Cette mesure est proche de la température totale et doit être corrigée du chauffage adiabatique résultant de la compression de l'air par rapport à la pression statique. Cette correction permet de déduire la température statique.

Le rapport de mélange de vapeur d'eau est calculé à partir de la mesure de la température du point de rosée par un hygromètre à miroir refroidi (General Eastern 1011). Ce type d'hygromètre est très fiable et très précis mais présente un temps de réponse lent ($> 1 \text{ s}$) et ne convient donc pas aux mesures de turbulence. Un capteur rapide de type LI-7500 (absorption dans l'infra-rouge) a été installé sur le fuselage de l'avion (*Muskardin and Rozen, 2007*) pour la mesure de l'humidité et de la concentration en CO_2 à des fréquences pouvant aller jusqu'à 20 Hz. Cette mesure de l'humidité est calibrée en utilisant le rapport de mélange déduit de la mesure de la température du point de rosée.

La partie la plus complexe concerne le calcul des trois composantes du vent. Le vent est déduit de la somme de la vitesse de l'avion par rapport au sol et de la vitesse de l'air par rapport à l'avion, mesurés respectivement par la centrale inertielle (IXSEA) et un tube pitot rapide (équipé de capteurs de pression de type Rosemount 1221). La centrale inertielle mesure aussi l'accélération dans les trois directions. Les angles de dérapage et d'incidence sont mesurés à l'aide de capteurs de pression disposés en cercle sur le radome. Le principe de ce dispositif est décrit par *Brown et al. (1983)*. Le calcul des trois composantes du vent dans les directions nord, est, et verticale se fait avec les relations

données par *Lenschow* (1986) et *Axford* (1968). Le calcul simplifié de la composante verticale (w) est donnée par :

$$w = W + M(\alpha - \Theta) + l\dot{\Theta} \quad (5.1)$$

avec W la vitesse verticale de l'avion par rapport au sol, M la vitesse de l'air par rapport à l'avion. Les angles α et Θ sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de tangage. La distance entre la centrale inertielle et les mesures de vitesse sur le radome est notée l .

Les mesures de turbulence en avion font parties des compétences fortes de l'équipe ANTEE (*Durand et al.*, 1998; *Lambert and Durand*, 1998; *Saïd et al.*, 2005, 2010).

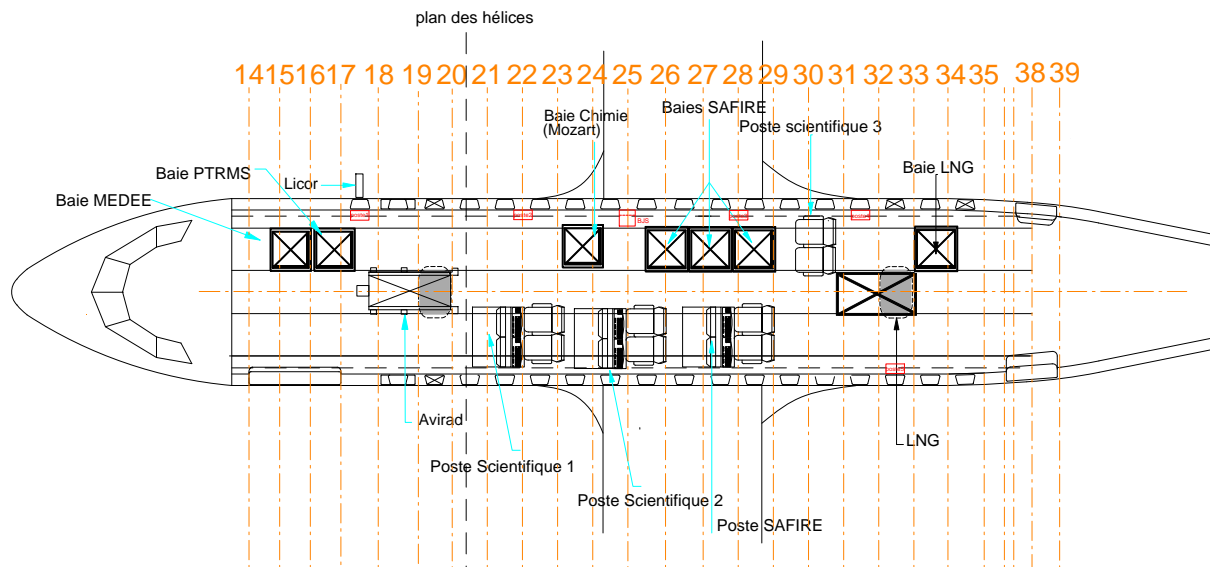


FIGURE 5.15 – Plan de l'aménagement cabine de l'ATR-42 SAFIRE pour la campagne TRAQA.

L'instrument MEDEE dans sa version aéroportée, c'est à dire monté dans une baie 19" avec l'ensemble de ses modules a été installé dans l'ATR-42 en partie avant de la cabine, coté droit (figure 5.15). Une prise d'air se trouve en face de la baie MEDEE à 55 cm du plancher de la cabine. A cette hauteur la distance horizontale qui sépare la baie de la prise d'air est de 50 cm. Les électrovannes de prélèvement ont été installées à la hauteur de la prise d'air et connectées sur la prise d'air par deux tubes Teflon de diamètre interne de 9,6 mm (figure 5.16).

La prise d'air présente vers l'extérieur deux tubes en acier dont l'extrémité est en biseau pour éviter l'aspiration de poussières. Chacun des deux tubes est connecté à une électrovanne de prélèvement.

A l'extérieur, la distance qui sépare la prise d'air de MEDEE du LI-7500 installé sur le fuselage est d'environ 1,50 m (figure 5.17). La distance qui sépare le nez de l'avion (mesure de vent) de la prise d'air de MEDEE est de 4,30 m.

Un analyseur de CO_2 et vapeur d'eau (LI-6262) est installé dans la baie MEDEE et couplé au système MEDEE. Une photo de la face avant de la baie MEDEE dans l'avion montre l'agencement des différents boîtiers (figure 5.18).

Une connexion a été prévue pour coupler un analyseur supplémentaire, le PTR-MS qui est placé dans la baie mitoyenne. Un té en inox sépare le flux d'échantillon en deux vers chaque analyseur. Un bouchon ferme la troisième entrée du té lorsque le PTR-MS n'est pas

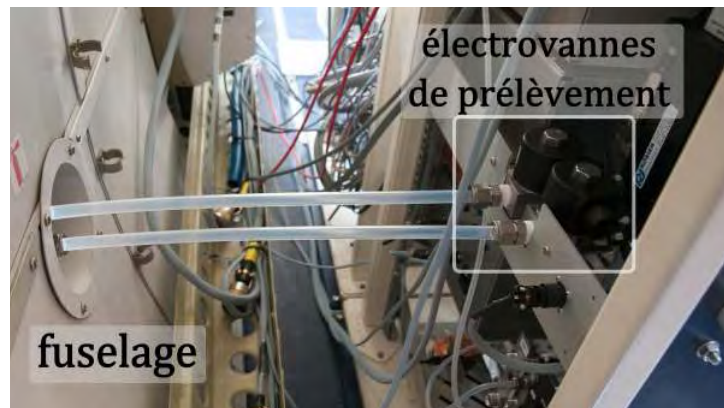


FIGURE 5.16 – Connexion pneumatique entre la prise d'air et les électrovannes de prélèvement à l'arrière de la baie MEDEE.



FIGURE 5.17 – Vue de la partie droite du fuselage de l'ATR-42 avec entourée en rouge la position de la prise d'air de MEDEE et en vert la position du capteur LI-7500.

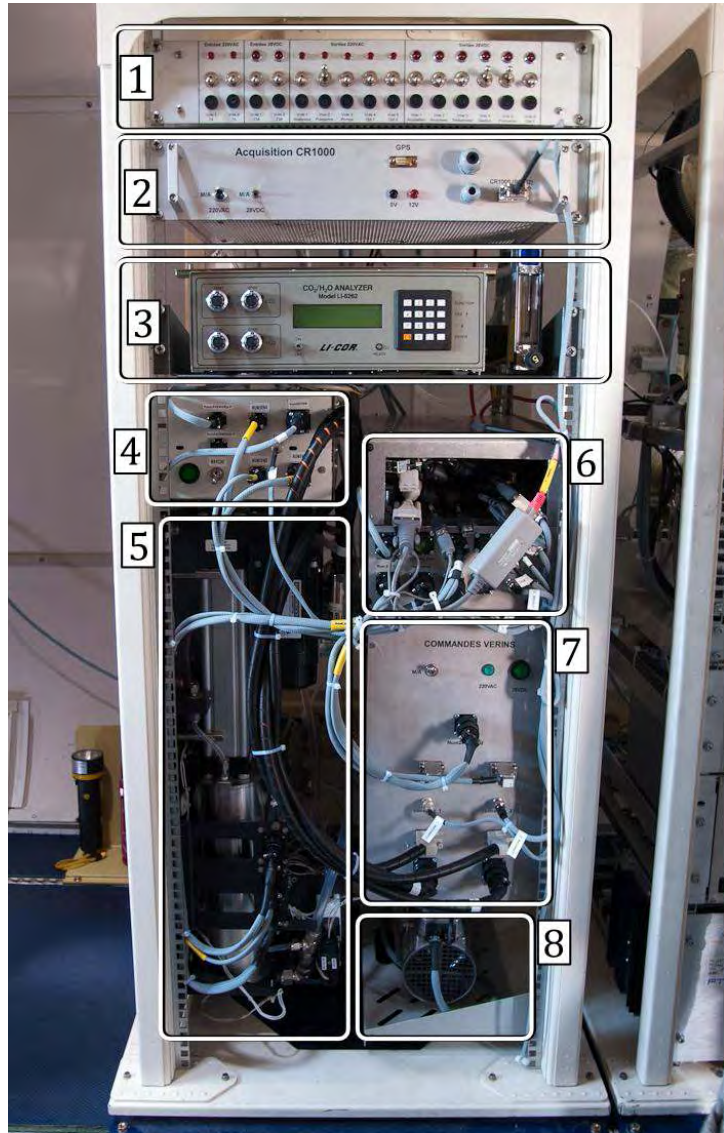


FIGURE 5.18 – Baie MEDEE vue de face dans l'ATR-42. De haut en bas, le boîtier de distribution des alimentations (1), l'acquisition (2), l'analyseur LI-6262 (3), le boîtier du microcontrôleur (4), la partie mécanique du système de prélèvement (5), le PC embarqué (6), les drivers vérins (7) et la pompe à vide (8).

connecté. Les longueurs de tubes entre les réservoirs et les analyseurs ont été minimisées pour réduire le temps de transit de l'échantillon des réservoirs vers les analyseurs. Le débit de pompage du LI-6262 a été réduit à $0,5 \text{ l mn}^{-1}$ pour s'assurer d'un flux d'air constant pendant le temps d'analyse pour chaque phase de vol.

5.3.2 Procédures de vol

Les deux objectifs principaux du projet MEDEE pendant la campagne TRAQA sont de valider l'utilisation de l'instrument en avion pour la mesure de flux par DEC et de tester le couplage avec un analyseur PTR-MS pour la mesure de flux de COV. Un troisième objectif consiste à étudier la faisabilité des mesures de flux lors de trajectoires circulaires.

La mesure de flux en avion comporte quelques particularités. Généralement des périodes de 4 à 5 minutes sont utilisées pour le calcul des flux. En avion, une période de 5 mn correspond à une distance parcourue d'environ 30 km ce qui permet d'échantillonner suffisamment de tourbillons pour calculer un flux. Les flux sont calculés sur des trajectoires rectilignes où les incertitudes sur le calcul de la vitesse verticale sont minimisées (angles d'attaque, de roulis et de tangage faibles).

Avec la méthode DEC, le calcul du flux doit être fait sur une période d'au moins 15 mn pour avoir suffisamment d'échantillons (section 2.4.6). En avion une période de 15 mn correspond à une distance parcourue d'environ 100 km. Il est difficile de trouver une surface homogène d'extension de 100 km en France. En effet, en vue de la campagne *ChArMEx* de 2013, un des objectifs de la campagne TRAQA était de tester la mesure de flux de COV sur la forêt de chênes pubescents. Il n'a pas été possible de localiser une forêt de chênes pubescents homogène sur suffisamment de kilomètres pour être survolée en 15 min. Une trajectoire circulaire a donc été envisagée pour pouvoir rester au-dessus de la zone à étudier pendant un temps assez long. Ce type de trajectoire n'ayant pas été testé auparavant pour la mesure de flux par EC ou DEC, plusieurs séquences de vol ont ainsi été effectuées au dessus de la forêt des Landes. Les séquences de vol correspondantes à des survols de la forêt des Landes doivent permettre de valider les séquences de vol non rectiligne.

La campagne TRAQA a totalisé un nombre de 17 vols. Parmi ces 17 vols, deux vols ont été spécifiquement dédiés aux tests de MEDEE et plusieurs autres séquences de vol ont permis de mesurer les flux par DEC. Le premier s'est déroulé au-dessus des Landes et au-dessus de l'océan avec pour les mesures de flux deux axes rectilignes de 15 min en survol à basse altitude (90-95 m) et deux séquences de 15 min en trajectoire circulaire au-dessus de la forêt des Landes. Puis en seconde partie, deux axes rectilignes de 15 min au-dessus de l'océan (105-115 m). Pour le second vol, deux phases de 15 min ont été effectuées avec une trajectoire en hippodrome sur une forêt de chênes pubescents en Haute Provence, suivie de deux phases de 15 min sur une zone agricole homogène, près de la ville d'Avignon. MEDEE a aussi pu fonctionner pendant d'autres séquences lorsque les conditions étaient propices à la mesure de flux, c'est à dire lorsque l'altitude de vol était faible et que la zone survolée était homogène (mer Méditerranée, océan Atlantique).

Les trajectoires circulaires ont été effectuées lorsque la zone d'étude ne présentait pas une extension horizontale suffisamment grande. Les flux sont calculés sur une période d'environ 15 min.

Code vol	Trajectoire	Surface	Altitude /sol (m)
vol17c1	circulaire	forêt des landes	115
vol17c2	circulaire	forêt des landes	105
vol17a1	axe rectiligne	forêt des landes	90
vol17a2	axe rectiligne	forêt des landes	95
vol17a3	axe rectiligne	océan At.	620
vol17a4	axe rectiligne	océan At.	620
vol20a1	axe rectiligne	mer Med.	750
vol21a1	axe rectiligne	mer Med.	315
vol27a1	axe rectiligne	mer Med.	165
vol27a2	axe rectiligne	mer Med.	580
vol27a3	axe rectiligne	mer Med.	580
vol28a1	axe rectiligne	mer Med.	550
vol28a2	axe rectiligne	mer Med.	930
vol29c1	circulaire	forêt de chênes	200
vol29c2	circulaire	forêt de chênes	200
vol29c3	circulaire	zone agricole	182
vol29c4	circulaire	zone agricole	182
vol30a1	axe rectiligne	mer Med.	550

TABLE 5.1 – Liste des périodes de vol de 15 mn avec MEDEE en fonctionnement pour la campagne TRAQA.

5.3.3 Traitement des données

Au total, 19 périodes de vol ont été traitées pour l'ensemble de la campagne (tableau 5.1). Le code vol différencie chaque période de vol. La lettre "a" signifie que la trajectoire de vol pendant la période était rectiligne, la lettre "c" indique une trajectoire circulaire.

Les séquences de vol 17c1, 17c2, 17a1, 17a2 correspondent donc à des survols de la forêt des Landes circulaires et rectilignes. Les séquences de vol 29c1 et 29c2 correspondent au survol de la forêt de chênes pubescents à proximité de Montmeyan en Haute Provence. Les séquences de vol 29c3 et 29c4 sont faites sur une zone agricole à proximité d'Avignon en cercles.

Les données mesurées par l'avion sont récupérées après avoir été traitées par une filière de calcul de l'équipe ANTEE (*Saïd et al.*, 2010). Le fichier de données comprend la vitesse verticale w , la température T en degré C, le rapport de mélange de vapeur d'eau r en g kg⁻¹ puis les vitesses horizontales de l'air u et v . Les vitesses sont exprimées en m s⁻¹. Un filtre spectral est appliqué aux séries temporelles pour isoler les fluctuations. La date de début de la série est connue au centième de seconde et la fréquence de calcul ou l'intervalle de temps entre chaque ligne est de 1/25^e de seconde.

Une première étape consiste à synchroniser ces mesures. En effet, il existe un décalage temporel entre la mesure de vent ou de température et la mesure d'humidité. Ce décalage est dû à la distance qui sépare les capteurs, au temps de transit de l'information entre le PC d'enregistrement du signal du LI-7500 et la centrale d'acquisition de l'avion et au retard de l'émission du signal par le capteur. Une étude de la fonction d'inter-corrélation entre les paramètres w et q , et T et r permet de déterminer le décalage temporel. Un exemple de fonction d'inter-corrélation est illustré par la figure 5.19. Le décalage temporel est donné par la position du maximum de la fonction d'intercorrélation.

D'autre part, la centrale d'acquisition de MEDEE enregistre aussi le signal du LI-7500. Ce signal à la fois enregistré par l'avion et la centrale de MEDEE permet de synchroniser les signaux de l'avion avec les mesures de MEDEE. Les données avion à 25 Hz sont ré-

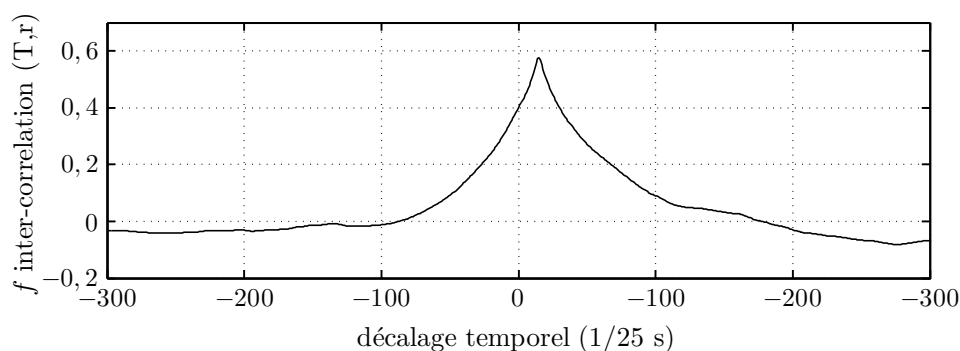


FIGURE 5.19 – Exemple de fonction d’inter-corrélation pour les variables T et r .

échantillonnées à 10 Hz pour les calculs de flux. Une fois l’ensemble des données disponibles sous la même base de temps (10 Hz) la synchronisation est vérifiée par étude de la fonction d’inter-corrélation.

La sélection des périodes de calcul de flux se fait en fonction des séquences de vols. Des périodes de 15 min pendant lesquelles l’avion survole une zone homogène et à altitude constante ont été sélectionnées pour le calcul des flux. Une analyse du produit $w'q'$ et de la somme cumulée du produit sur la période permet de s’assurer des conditions de stationnarité. La figure 5.20 montre la série $w'q'$ et sa somme cumulée en fonction du temps pour une période du vol 29. La courbe représentant la somme cumulée se rapproche d’une droite et ceci montre que le flux est spatialement homogène.

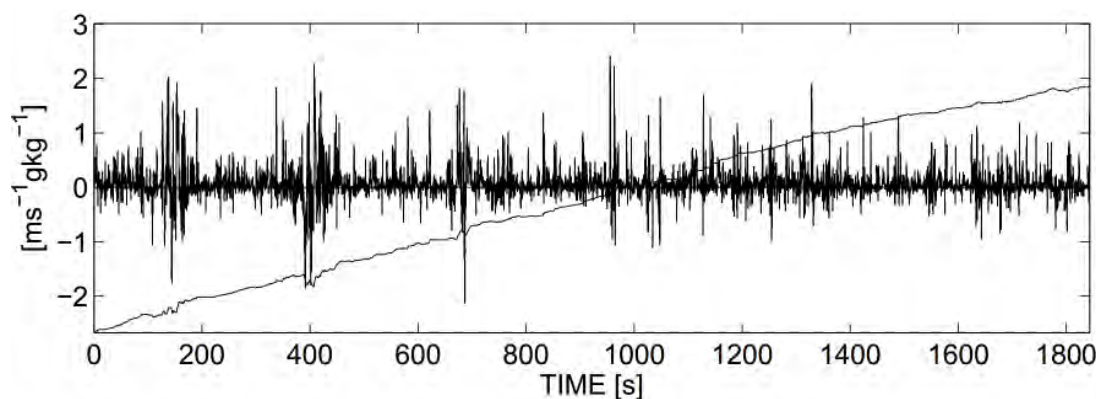


FIGURE 5.20 – Série temporelle du produit $w'q'$ et de la somme cumulée de $|w'q'|$ pour une période de 30 min pendant le vol 29.

Les concentrations mesurées par le LI-6262 couplé à MEDEE ont été converties en rapport de mélange en utilisant la température et la pression de la cellule de mesure de l’analyseur. Une perturbation importante a été observée sur les mesures de concentration en CO_2 par le LI-6262. Son origine n’a pas pu être identifiée clairement et les données ne sont donc pas présentées. Les échantillons de la DEC sont datés selon la méthode décrite dans la section 4.5 et les flux sont calculés par la méthode EC, DEC simulée et DEC pour chaque période de vol sélectionnée. Seuls les flux de chaleur latente ont été calculés.

Code vol	Altitude/surface (m)	EC	DEC sim.	DEC
		LE (w m^{-2})	LE (w m^{-2})	LE (w m^{-2})
17c1	115	336,69	140,64	24,55
17c2	105	215,16	257,16	217,61
17a1	90	158,50	231,88	158,13
17a2	95	145,75	136,81	122,87
17a3	620	-35,12	-71,70	-55,87
17a4	620	105,95	84,52	94,02
20a1	750	-20,64	-15,41	-5,99
21a1	315	7,05	-1,15	-4,74
27a1	165	47,39	62,91	38,41
27a2	580	3,48	6,94	8,00
27a3	580	0,81	6,63	15,84
28a1	550	6,22	-12,97	-14,17
28a2	930	19,42	14,69	14,98
29c1	200	189,83	241,36	239,28
29c2	200	200,16	245,91	241,51
29c3	182	243,82	546,07	494,37
29c4	182	254,67	256,77	281,25
30a1	550	17,71	9,85	11,52

TABLE 5.2 – Liste des périodes de vol et des flux de chaleur latente calculés pour la campagne TRAQA.

5.3.4 Résultats

Le tableau 5.2 présente pour chaque période de vol, les flux de chaleur latente calculés par les méthodes EC, DEC simulée et DEC. Les flux calculés pour les périodes 17c1 et 29c3 (en rouge) n'ont pas été pris en compte dans les comparaisons entre les différentes méthodes. Comme l'indique le tableau 5.1 les flux DEC simulée et DEC sont très différents des flux EC pour ces deux séquences. Ce désaccord important n'est pas lié à l'instrument MEDEE mais à la technique DEC. L'analyse des séries temporelles correspondantes n'a pas permis de donner une explication directe mais souligne le besoin d'une étude approfondie du calcul de flux sur des trajectoires circulaires.

La figure 5.21 présente une comparaison des flux par la technique EC et la DEC simulée. Le coefficient de détermination $R^2 = 0,96$ est proche de 1 et on observe pour les valeurs fortes de flux une légère sur-estimation de la technique DEC simulée qui se traduit par une pente de 1,19. La comparaison des flux EC avec les flux DEC est présentée dans la figure 5.22. Le coefficient de détermination $R^2 = 0,97$ est légèrement supérieur à celui de la comparaison de l'EC et de la DEC simulée. La pente de la droite de régression est de 1,12 et signifie que les flux par DEC sont en moyenne 12% plus fort que les flux par EC. Si l'on compare les régressions linéaires des deux comparaisons on observe une même surestimation des flux par la méthode DEC.

Les flux calculés avec la DEC simulée et les flux mesurés par DEC avec le système MEDEE présentent des corrélations avec les flux mesurés par EC semblables et des pentes de droite de régression proches. Ces résultats sont encourageants et montrent que le système MEDEE est adapté à la mesure de flux en avion.

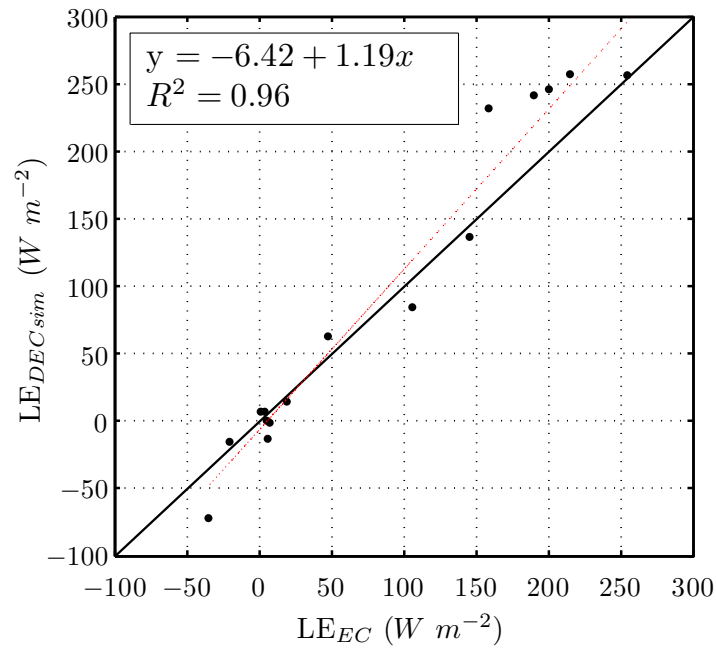


FIGURE 5.21 – Comparaison des flux de chaleur latente calculés par DEC simulée et EC durant la campagne aéroportée TRAQA. La droite noire correspond à la pente 1 :1 et la droite rouge à la régression linéaire.

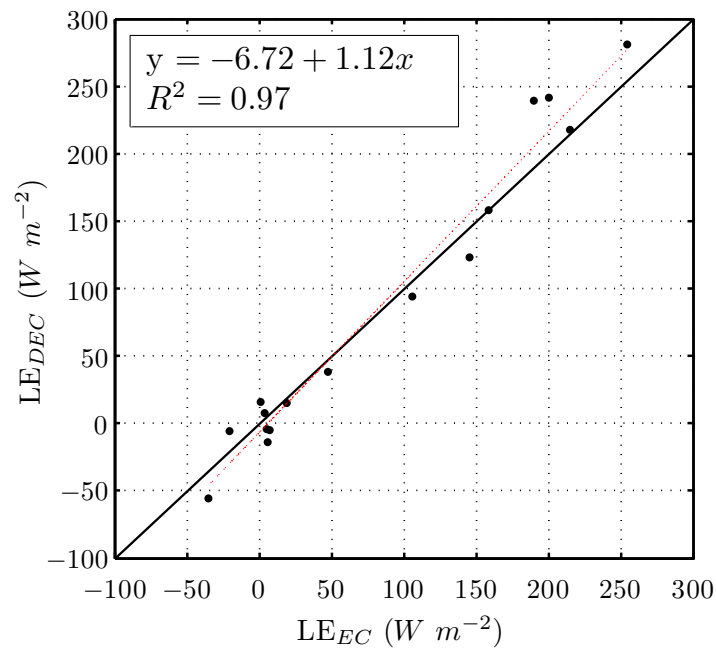


FIGURE 5.22 – Comparaison des flux de chaleur latente calculés par DEC et EC durant la campagne aéroportée TRAQA. La droite noire correspond à la pente 1 :1 et la droite rouge à la régression linéaire.

5.4 Conclusion

Deux campagnes de mesure ont été menées dans le but de valider les mesures de flux par la technique DEC avec le système MEDEE. Ces campagnes ont consisté en une comparaison des flux mesurés simultanément par un système EC et par DEC avec MEDEE.

La première campagne de mesure s'est déroulée au sol, dans un champ de triticales et la seconde en avion lors de la campagne TRAQA. Les résultats de ces deux campagnes ont permis de démontrer la compatibilité du système MEDEE pour la mesure des flux par DEC, les corrélations entre les deux techniques étant supérieures à 0,9 dans les deux cas pour les flux de chaleur latente. La comparaison au sol a fait apparaître un biais dans la mesure des flux de chaleur latente et de CO_2 qui s'est traduit par une légère sous-estimation de 14 % des flux par DEC avec MEDEE par rapport aux flux par EC. Plusieurs raisons ont été avancées pour expliquer ce désaccord :

- Une différence de réponse des analyseurs en conditions de flux faibles.
- Un effet de contamination de l'échantillon par l'échantillon précédent et par le volume d'air piégé dans les tubes de prélèvement.
- Un effet d'atténuation des fluctuations de rapport de mélange dans le tube de prélèvement.
- Un effet d'adsorption/désorption sur les surfaces.

En avion, seul les flux de chaleur latente ont pu être calculés. Des périodes de calcul de 15 mn ont été utilisées. Les séquences de vol ont eu lieu au-dessus de la mer, au dessus de la forêt des Landes, au dessus d'une zone agricole près d'Avignon et au dessus d'une forêt de chênes pubescents en Haute Provence. Une forte corrélation a été observée entre les flux EC et les DEC avec une légère sur estimation (12 %) des flux DEC. D'autres séquences de vol en trajectoires circulaires ont été effectuées. Une étude approfondie des incertitudes sur le calcul de flux sur des trajectoires en cercle est nécessaire pour valider ces mesures.

Chapitre 6

Mesures des flux d'isoprène

6.1 Introduction

La diversité des sources et processus à l'origine des émissions naturelles de COV dans l'atmosphère rend les mesures in situ essentielles pour améliorer la compréhension et la modélisation de ces émissions.

La construction du système MEDEE s'est terminée au mois de juin 2010. Les émissions de COV par les plantes étant maximum pendant l'été et proches de zéro en hiver, il a été choisi de privilégier les mesures de flux de COV plutôt que les mesures de validation de l'instrument dont le déroulement n'est pas contraint par les saisons.

Une première campagne de mesure a donc été menée à l'été 2010, du 24 juillet au 6 août et du 30 août au 2 septembre à l'Observatoire de Haute Provence (OHP) sur une forêt de chênes pubescents. Cette campagne a été mise en place dans le but d'améliorer la caractérisation des émissions de COV par les végétations caractéristiques du bassin méditerranéen. Une seconde campagne de mesure a été effectuée pendant l'été 2011, sur le même site mais à une période plus avancée dans l'été du 4 au 12 août, du 5 au 8 septembre et du 11 au 13 octobre.

Dans ce chapitre le site de mesure est présenté ainsi que le dispositif expérimental. Seuls les résultats des mesures de la campagne du 24 juillet au 6 août 2010 sont illustrés et analysés. En effet, des dysfonctionnements de l'analyseur de COV utilisé pendant les campagnes de mesures en 2011 ont perturbé les mesures de COV et rendu les données inexploitable pour le calcul de flux.

6.2 Stratégie expérimentale

Les objectifs de ces travaux sont de mettre en œuvre la technique DEC qui permet de mesurer les flux de COV à l'échelle de la canopée et de proposer, en s'appuyant sur les données collectées, une paramétrisation des émissions d'isoprène par les végétations méditerranéennes. Le choix du dispositif expérimental et du site ont donc été menés en accord avec ces objectifs.

6.2.1 Choix du site de mesures

Le premier enjeu a été d'identifier un site de mesure qui corresponde aux critères de l'étude et facilite l'installation de matériel scientifique. Deux écosystèmes sont typiques du

bassin méditerranéen : le maquis ou garrigue constitué d'arbustes à feuilles persistantes et la forêt. Dans l'écosystème forestier, les espèces dominantes sont le chêne pubescent (*Quercus Pubescens*), le chêne vert (*Quercus Ilex*) et le pin d'Alep (*Pinus Halepensis*). L'analyseur disponible pour cette campagne est un analyseur rapide d'isoprène (FIS, Fast Isoprene Sensor). Il n'est donc capable de mesurer qu'un seul COV. L'isoprène est certes le composé majoritairement émis par un grand nombre de sources, mais ce n'est pas le cas pour le chêne vert ou le pin d'Alep dont les émissions sont principalement constituées de monoterpènes. La forêt de chênes pubescents constitue un sujet d'étude idéal puisque les émissions de cette espèce sont quasi uniquement constituées d'isoprène (Keenan *et al.*, 2009). Les techniques de mesures de flux à l'échelle de la canopée, par micrométéorologie nécessitent une surface ou une canopée homogène horizontalement sur un terrain présentant un minimum de relief pour ne pas perturber l'écoulement, ce qui risquerait d'introduire des incertitudes ou biais dans les mesures. Le site doit aussi présenter des facilités logistiques, c'est à dire qu'il doit permettre un accès facile pour l'installation de matériel scientifique, le raccordement au réseau électrique (l'utilisation d'un groupe électrogène rejette des polluants susceptibles de perturber les mesures). Il doit aussi être sécurisé par rapport aux équipements scientifiques coûteux. Ces contraintes logistiques sont souvent identiques pour plusieurs domaines de la recherche sur l'environnement et plusieurs laboratoires de recherche disposent de sites expérimentaux déjà équipés dans le sud de la France sur le pourtour du bassin méditerranéen. Parmi ces sites, l'Observatoire du chêne pubescent à l'observatoire de Haute Provence a semblé répondre au mieux à nos critères et a donc été choisi. Une description du site est faite dans la suite de ce chapitre.

6.2.2 Choix du dispositif expérimental

L'objectif final d'utiliser un réseau de neurones artificiels (méthode statistique) pour modéliser les émissions de COV a fortement guidé l'élaboration du dispositif de mesure. La mesure des flux d'isoprène ne présente des intérêts scientifiques que lorsqu'elle est accompagnée de mesures concomitantes des paramètres environnementaux potentiellement liés aux émissions par des processus physiques ou physiologiques de la plante. D'après la littérature (section 3.2) les principaux paramètres dont dépendent les émissions d'isoprène sont identifiés comme étant la température des feuilles et le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). D'autres variables environnementales influencent les flux de COV mais leur rôle n'est pas toujours quantifié et compris. Cependant leur prise en compte dans la construction d'un modèle peut permettre d'améliorer les résultats de ce modèle. Un dispositif de mesure a donc été imaginé pour répondre à ces objectifs. Ce dispositif prévoit la mesure des principaux paramètres météorologiques (vent, température, humidité, rayonnement, précipitations), une station de flux avec la mesure des flux d'isoprène, de chaleur sensible, chaleur latente, de CO₂ et une station de mesures chimiques avec la concentration d'ozone et la concentration d'oxydes d'azotes (NO_x).

Les flux de chaleur latente et flux de CO₂ ont été ajoutés au dispositif. En effet le flux de chaleur latente est directement lié à l'évapotranspiration au niveau de la plante, surtout dans les environnements secs où le sol n'est pas une source d'évaporation forte. Il s'agit donc de l'émission d'un gaz depuis la plante et en particulier des feuilles vers l'atmosphère, et en ce sens le flux de chaleur latente pourrait être lié au flux d'isoprène. Pour le CO₂, le flux est négatif pendant la journée (capture) et constitue une mesure de l'activité photosynthétique de la plante. Cette activité photosynthétique est en lien avec

la production d'isoprène dans les plantes et donc en lien avec son émission potentielle. La nuit la plante rejette du CO_2 lors de la respiration, il n'y pas de photosynthèse et donc pas de création d'isoprène. Cependant ce processus est aussi fortement corrélé avec le PAR et peut de ce fait constituer un apport d'information redondant pour la modélisation.

6.3 Description du site de l'OHP

La campagne de mesure s'est déroulée à l'Observatoire de Haute Provence (OHP) et plus précisément à l'observatoire du chêne pubescent (O3HP, Oak Observatory at OHP, www.obs-hp.fr/O3HP) qui se situe dans le sud-est de la France dans le département des Alpes-de-Haute-Provence et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, à environ 70 km au nord de Marseille.

Historiquement l'Observatoire de Haute-Provence est dédié à la recherche en astronomie mais la présence d'une forêt de chênes pubescents sur son domaine a récemment permis la création d'un site expérimental pour l'étude de l'écosystème que représente la chênaie pubescente. Ce projet est piloté par Thierry Gauquelin, professeur à l'université d'Aix-Marseille et spécialiste en écologie fonctionnelle et sous la charge d'Ilja Reiter, ingénieur de recherche au CNRS. Les différents laboratoires impliqués dans le projet de l'O3HP sont : l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE), l'OHP, le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), et l'Institut de Biologie Environnementale et Biotechnologie (IBEB).

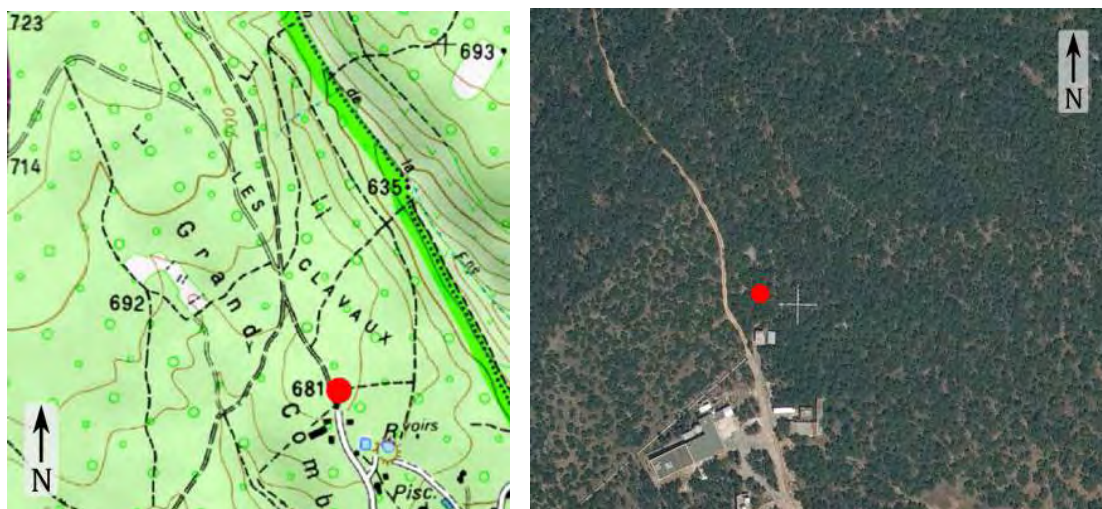
6.3.1 Description géographique et climatologique du site

Le site est situé à une altitude de 680 m. Un extrait de carte topographique de 1 km de côté est présenté par la figure 6.1a. Le site de mesure y est localisé par un point rouge. Le relief présente une pente insensible dans un axe nord ouest - sud-est. La pente est de 2,7 % sur les premiers 365 m depuis le site dans la direction nord-ouest puis augmente à 5 % au-delà. À 400 m au nord-est du site on observe une ravine dans un axe nord-ouest - sud-est. Les changements de pente associés à la ravine se situent à une distance de 260 m du site.

La figure 6.1 est une photo aérienne du site montrant une zone de 300 m dans le sens est - ouest et de 260 m dans le sens nord - sud. La chênaie se situe dans l'étage supra-méditerranéen qui correspond encore à un climat méditerranéen mais avec une période de sécheresse estivale raccourcie à un mois à cause de l'altitude. Cette sécheresse estivale caractéristique du climat méditerranéen peut durer jusqu'à 3 mois à plus faible altitude.

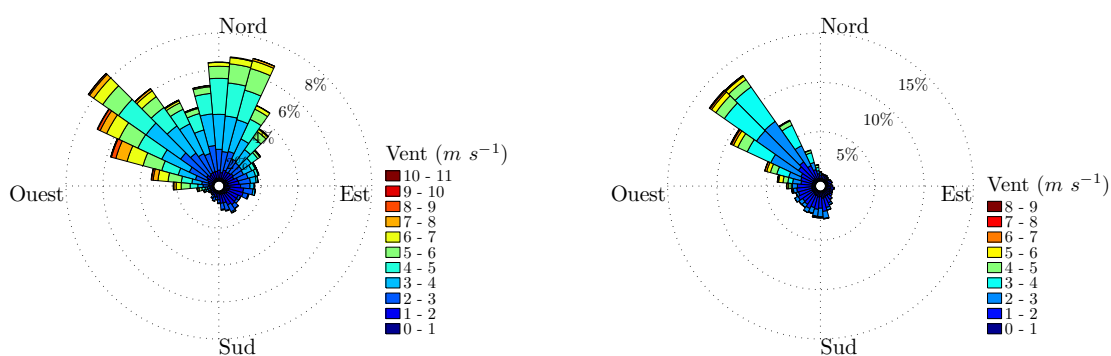
Le site est sous l'influence du mistral, comme le confirment les figures 6.2a et 6.2b qui représentent les roses des vents pour les journées et les nuits du 25 juillet au 1^{er} septembre 2010. Ces mesures de vent ont été réalisées sur la station de mesure de flux.

Les deux directions de provenance du vent dominantes sont le Nord et le Nord-ouest pendant la journée. La nuit, seule la direction de Nord-Ouest domine. On remarque aussi que les occurrences de vent dans des directions autres que les directions dominantes sont très faibles.



(a) Carte IGN de l'O3HP, de 1 km \times 1 km. La situation de la station de mesures L'échelle de la zone représentée est de 300 m de est indiquée par le point rouge, aux co- large et 260 m de haut. ordonnées géographiques longitude 5° 42' 37,5" E et latitude 43° 56' 06,9" N.

FIGURE 6.1 – Site de mesure de l'OHP.



(a) Rose des vent en journée.

(b) Rose des vent de nuit.

FIGURE 6.2 – Rose des vents pour la période du 25 juillet au 1^{er} septembre 2010 avec une division en 36 secteurs (résolution radiale de 10°). Vents mesurés sur la station de mesure de flux.

6.3.2 Étude de l'empreinte des mesures de flux ou footprint

L'utilisation de techniques de micrométéorologie pour la mesure de flux implique que la surface étudiée soit homogène horizontalement. Cette condition est rarement vérifiée en réalité, on a donc recours à des modèles pour déterminer la contribution relative des zones sources. L'extension de cette surface appelée empreinte du flux ou footprint dépend de plusieurs paramètres dont la hauteur des capteurs, la stabilité de l'atmosphère, l'intensité du vent et la rugosité de la surface. On parle aussi de footprint pour désigner la fonction f qui relie les flux mesurés à la contribution relative d'une zone par unité de surface.

Il existe plusieurs modèles pour estimer le footprint d'une parcelle, ici nous avons utilisé le modèle de *Kljun et al.* (2004). Ce modèle est basé sur une paramétrisation qui rend sa formulation simple et qui traite toutes les situations de stabilité atmosphérique. Il est accessible sur une interface web interactive à l'adresse www.footprint.kljun.net. Le modèle requiert comme paramètres d'entrée la vitesse de friction (u_*), l'écart-type des fluctuations verticales du vent (σ_w), la hauteur de mesure (z_m), la longueur de rugosité du terrain (z_0) et la hauteur de la couche limite (h). Les auteurs recommandent comme conditions limites : $u_* \geq 0,2 \text{ m}^{-1}$, $z_m > 1 \text{ m}$ et $-200 \leq z_m/L_{MO} \leq 1$, L_{MO} étant la longueur de Monin-Obukhov.

La vitesse de friction u_* est donnée par $u_* = (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4}$. La hauteur de mesure est de 9,5 m et la hauteur de la couche limite est de l'ordre de quelques centaines de mètres. On prendra la valeur de 1000 m pour h . L'influence de la hauteur de la couche limite sur le footprint est faible lorsque la hauteur de mesure est faible.

Le calcul de la longueur de rugosité (z_0) est possible à partir de données de profil de vent. Ces données ne sont pas disponibles dans notre cas et on utilise alors la théorie de similitude de Monin-Obukhov qui donne une formulation du profil de vent dans la couche de surface en conditions neutres. La stabilité de l'atmosphère est caractérisée par le paramètre z_m/L_{MO} ou indice de stabilité noté ζ .

Dans des conditions neutres, c'est à dire pour un indice de stabilité $0 < z_m/L_{MO} < 0,1$, on peut écrire :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z_m}{z_0} \right) \quad (6.1)$$

Dans le cas où les obstacles de la surface sont importants, ce qui est le cas pour une forêt alors on a : $z_m = z - z_d$, z_d étant la longueur de déplacement ou la hauteur de sol fictive. La longueur de déplacement est de l'ordre de deux tiers de la hauteur de la canopée. On a donc dans notre cas une hauteur $z_m = 9,5 - 5,5 (2/3) = 5,8 \text{ m}$. Pour ce site, la longueur de rugosité a été calculée à $z_0 = 0,6 \text{ m}$, à partir de plusieurs situations neutres observées sur le site.

Deux situations atmosphériques typiques ont été choisies pour estimer l'empreinte du flux :

- Une situation instable avec un vent faible et des flux de chaleur forts (6.1).
- Une situation avec des vents forts (6.2).

Le paramètre σ_w a été estimé grâce dans les deux situations à partir de la gamme de valeurs observés par la station de flux pendant la période de mesure.

Les résultats du modèle pour les deux situations sont présentés dans la figure 6.3. Pour la situation vent faible et pour la situation vent fort la position du point de contribution maximale (d_{max}) est de 26 et 56 m et l'extension de la surface contribuant à 90 % est de

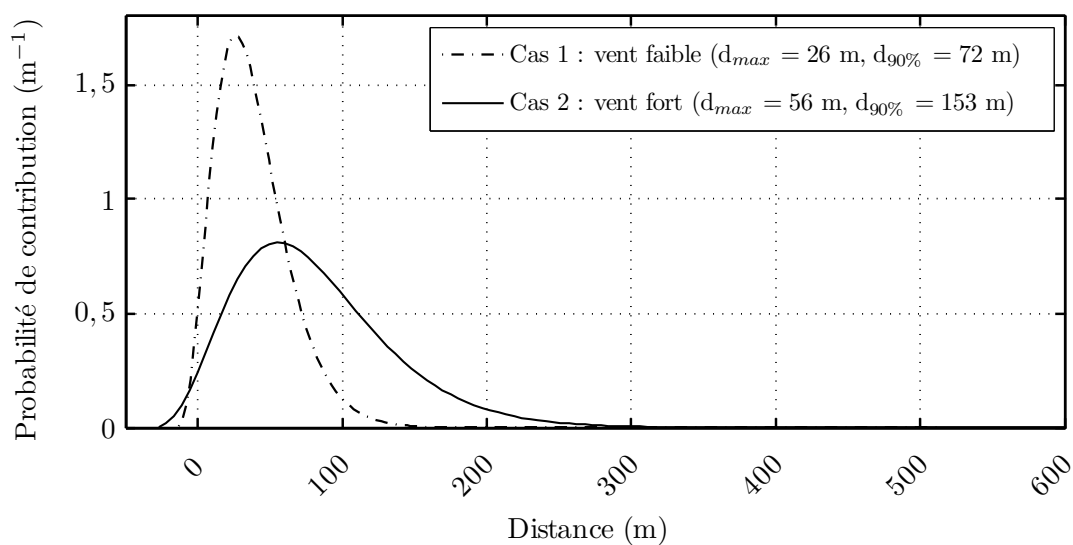
σ_w	0,55 m ² s ⁻²
u_*	0,2 m s ⁻¹
z_m	5,8 m
h	1000 m
z_0	0,6 m

TABLE 6.1 – Paramètres pour la situation vent faible.

σ_w	1,4 m ² s ⁻²
u_*	1,3 m s ⁻¹
z_m	5,8 m
h	1000 m
z_0	0,6 m

TABLE 6.2 – Paramètres pour la situation vent fort.

72 et 153 m, respectivement. Ces distances sont déterminées à partir de la position du mât de mesure et dans la direction du vent.

**FIGURE 6.3** – Estimation de l'extension de la zone contribuant au flux dans les directions de vent dominantes.

Sur la figure 6.4, une zone au nord-ouest de la station, est visible où le sol paraît presque nu. Cette parcelle hors du domaine de l'OHP est exploitée pour le bois et a été coupée quelques mois avant la campagne de mesure. À la période de la campagne elle était colonisée par une végétation jeune (< 1 an) composée principalement de jeunes chênes pubescents et de plantes herbacées.

Le report des résultats du modèle sur une photo aérienne du site (figure 6.4) montre que la zone contribuant à 90 % aux flux dans les deux conditions spécifiées est composée de forêt. Dans le cas de vent de nord ouest fort une contribution faible, inférieure à 10 %, pourrait parvenir de la parcelle exploitée.

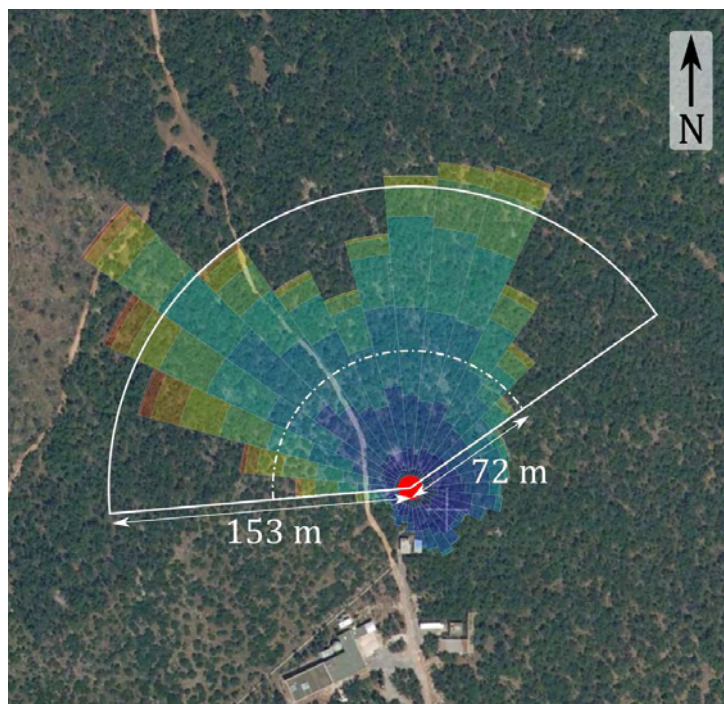


FIGURE 6.4 – Rose des vents (en journée) superposée à la photographie aérienne du site. Les arcs de cercle représentent les extensions des zones contribuant à 90 % du flux dans les situations de vent faible et vent fort.

6.3.3 La chênaie pubescente

Le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) fait partie avec le chêne vert (*Quercus ilex*) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), des espèces d'arbres caractéristiques du climat méditerranéen. Les émissions de COV par le chêne pubescent sont dominées par l'isoprène (Keenan et al., 2009). A contrario, les autres espèces de la région méditerranéenne comme le chêne vert, le pin parasol (*Pinus pinea*) ou le pin d'Alep présentent des émissions composées majoritairement de monoterpènes (Staudt et al., 2000).

Le site dispose d'une forêt constituée à 90 % de chênes pubescents et à 10 % d'érables de Montpellier (*Acer monspessulanum*). Le sous bois est colonisé par du sumac (*Cotinus coggygria*) et quelques plantes herbacées. Cette chênaie n'a pas été exploitée depuis plus de 70 ans et peut donc être qualifiée de forêt ancienne. Une parcelle plus petite située à l'ouest du site de mesure présente des arbres plus jeunes. On peut distinguer cette zone plus clairsemée sur la photo aérienne de la figure 6.1b. Vers le nord la forêt s'étend sur plusieurs kilomètres.

L'indice de surface foliaire (ou LAI pour Leaf Area Index) qui représente la surface totale des feuilles par unité de surface au sol a été mesuré au mois d'août 2010 à l'aide d'un LAI-2000 (LI-COR). Une valeur moyenne de 2,5 a été calculée à partir de ces mesures faites en différents points de la forêt au voisinage du site. La hauteur du sommet de la canopée est estimée à 5,5 m en moyenne.

6.4 Description du dispositif expérimental

Le site est équipé de passerelles disposées en croix à deux niveaux dans la végétation pour étudier le fonctionnement de l'écosystème. On peut apercevoir cette infrastructure sur la photo aérienne figure 6.1b à proximité à l'est du point rouge. La passerelle mesure 20 m de côté et possède un niveau à 80 cm du sol dans la canopée et un second niveau à 4 m pour atteindre la canopée.

Ce dispositif ne convient pas à la mise en œuvre des mesures de flux par DEC car cette technique requiert un niveau de mesure surplombant la végétation de plusieurs mètres. La hauteur du point de mesure ne doit pas se trouver près de la canopée pour ne pas subir de perturbations locales de l'écoulement dues à la structure de la cime des arbres.

Une structure a donc été érigée à proximité pour accueillir les instruments de mesure. Pour plus de stabilité cette structure haubanée forme un L à partir de deux échafaudages adossés de dimensions au sol 2 m x 80 cm. La figure 6.5 montre une photo de l'installation sur le site. Chaque échafaudage dispose de plateformes pour accueillir des instruments. Les plus hautes plateformes des deux échafaudages se trouvent respectivement à 8 m et 6 m au-dessus du sol.

Un mât de 2 m a été fixé au sommet de la face nord de l'échafaudage le plus haut pour installer les capteurs de la station de mesure de flux à une hauteur maximale.



FIGURE 6.5 – Station de mesure et son échafaudage dans la forêt de chênes pubescents à l'O3HP.

6.4.1 La station de mesure de flux

L'instrumentation scientifique est d'abord constituée d'une station de mesure de flux qui comprend un anémomètre sonique (CSAT 3, Campbell Scientific), un analyseur rapide de CO_2 et H_2O (LICOR 7500) et du système MEDEE couplé à un analyseur d'isoprène (Fast Isoprene Sensor, Hills Scientific). L'anémomètre, l'analyseur LICOR 7500 et les prises d'air du système MEDEE sont positionnés au sommet du mât à une hauteur de 9,5 m au-dessus du sol et environ 4,5 m au-dessus du sommet de la canopée. La tête de l'anémomètre est placée face au vent dominant avec une orientation de $308^\circ \pm 2^\circ$ par rapport au nord. L'analyseur LICOR 7500 ainsi que les prises d'air de MEDEE sont installés de façon à minimiser la distance avec le point de mesure du vent de l'anémomètre. La figure 6.6 illustre le positionnement de ces éléments.



FIGURE 6.6 – *Dispositif expérimental pour la technique EC comprenant un anémomètre sonique, un analyseur de CO_2 et H_2O et plusieurs tubes de prélèvements.*

Le système de prélèvement de MEDEE se trouve au pied du mât sur la plateforme de l'échafaudage et l'analyseur d'isoprène se trouve sur la passerelle du second échafaudage avec l'électronique de pilotage de MEDEE. Les électrovannes de prélèvement ont été déportées au sommet du mât pour minimiser les volumes morts dans les tubes de prélèvement. Sur chaque électrovanne un tube téflon (diamètre intérieur 9,6 mm) de 60 cm de long sert pour la prise d'échantillon. Les extrémités de ces tubes sont placées à environ 20 cm de la mesure de vent (figure 6.6). De l'autre côté des électrovannes, deux tubes téflon de même diamètre et de longueur 2 m connectent chaque électrovanne au système de prélèvement. L'analyseur d'isoprène est connecté au système de prélèvement par un tube téflon d'une longueur de 1,50 m et de diamètre interne 4 mm.

Pour cette campagne préliminaire de mesure le système MEDEE n'est pas dans une configuration optimale, et en particulier dispose d'électrovannes de prélèvement dont le diamètre intérieur ne permet pas une capture des échantillons suffisamment rapide (0,5 s au lieu de 0,2 s). Il en résulte une légère sous-estimation des flux car une partie du transport turbulent dans les hautes fréquences ne pourra pas être mesuré.

6.4.2 La station météorologique

Sur l'échafaudage ont aussi été installés un capteur de PAR (LICOR 190SA), un capteur de rayonnement (Kipp and Zonen CNR1) qui mesure les rayonnements incidents et réfléchis ou émis dans les courtes et les longues longueurs d'ondes. Ces deux instruments sont placés sur la face sud, au sommet de l'échafaudage le plus haut.

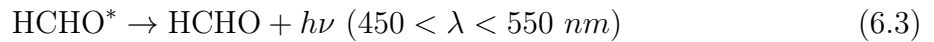
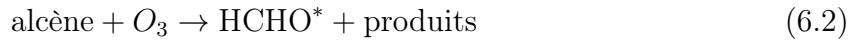
À environ 30 m au sud de l'échafaudage se situe un petit local qui sert à la fois de bureau et de stockage pour les équipements scientifiques. Un analyseur d'ozone (Thermo Environmental Instruments, modèle 49C) et un analyseur d'oxyde d'azote (Thermo Environmental Instruments, modèle 42C) ont été installés sur le toit de ce bâtiment pendant la période de la campagne pour caractériser les propriétés chimiques de la masse d'air. Les prises d'air des deux analyseurs ont été installées sur un mât à une hauteur de 7 m au-dessus du sol.

6.4.3 L'analyseur d'isoprène, Fast Isoprene Sensor (FIS)

L'analyseur d'isoprène (FIS) est un instrument qui permet la mesure rapide de la concentration d'isoprène dans l'air. Le modèle appartenant au Laboratoire d'Aérologie est un FIS-97, c'est à dire la version de 1997. Cet instrument est fabriqué par la société Hills scientific (Boulder, Colorado, USA).

Principe d'analyse

Le principe d'analyse de cet instrument repose sur le phénomène de chimiluminescence des produits issus de la réaction d'ozonolyse d'un alcène (réaction 6.2) (*Hills and Zimmerman*, 1990). Dans un environnement naturel, l'isoprène est l'alcène le plus largement répandu ce qui rend ce système quasi-spécifique à la molécule d'isoprène. Le retour à l'état fondamental de la molécule produite par la réaction d'ozonolyse se traduit par l'émission d'un photon (réaction 6.3).



Une pompe interne à l'analyseur fournit un débit continu de 4 l mn⁻¹ et permet le prélèvement d'air. Dans le circuit, de l'ozone est introduit en forte concentration. L'ozone est produit par un générateur à effet corona à partir d'oxygène pur. Le mélange se fait immédiatement en amont d'une chambre de réaction où se trouve le photomultiplicateur. L'excès d'ozone maintient une réaction d'ozonolyse de pseudo-premier ordre et induit une relation linéaire entre le nombre de photons et la concentration d'isoprène. Le photomultiplicateur détecte et compte individuellement les photons produits lors de la désexcitation des molécules. Ce procédé est très sensible car il n'y a pas d'autres sources de lumière dans la chambre de réaction.

Un gaz étalon contenant un mélange d'azote et d'isoprène à une concentration de 6,5 ppm permet d'étalonner l'analyseur via un système de dilution. Pour déterminer la relation entre le nombre de photons détectés et la concentration d'isoprène plusieurs points à des concentrations différentes sont nécessaires. Un exemple d'étalonnage est représenté par la figure 6.7. Ici des concentrations d'isoprène de 0, 7,5, 15 et 22,5 ppb ont été utilisées. La pente de la droite obtenue correspond à la sensibilité de l'instrument et l'intersection avec l'axe du graphique donne l'offset.

À partir des informations obtenues lors de l'étalonnage, la concentration d'isoprène dans la cellule de réaction peut être calculée selon la relation suivante :

$$[\text{Isoprène}]_{\text{cellule de réaction}} = \frac{\text{signal} - \text{offset}}{\text{pente}} \quad (6.4)$$

Le signal et l'offset sont exprimés en nombre de photons par seconde ou coups par seconde (cps) et la pente en cps par ppb d'isoprène. La concentration ambiante d'isoprène est déduite de la concentration d'isoprène dans la cellule de réaction et des débits dans l'instrument :

$$[\text{Isoprène}]_{\text{ambiante}} = \left(\frac{\text{signal} - \text{offset}}{\text{pente}} \right) \left(\frac{Q_{\text{total}}}{Q_{\text{total}} - Q_{O_2}} \right) \quad (6.5)$$

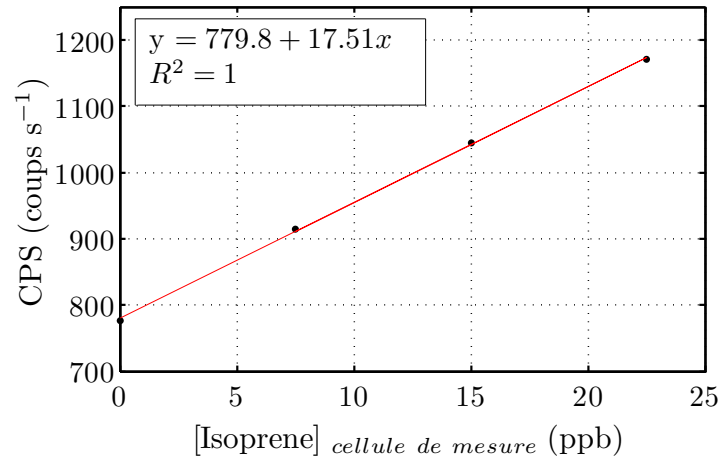


FIGURE 6.7 – Exemple de calibration de l'analyseur FIS.

Avec Q_{total} et Q_{O_2} correspondant respectivement au débit total dans l'analyseur et au débit du mélange d'oxygène et d'ozone.

Les paramètres qui déterminent la sensibilité de l'analyseur sont la concentration d'ozone produite par le générateur, la pression dans la chambre de réaction, le débit de pompage de l'échantillon et la température du photomultiplicateur et de la chambre de réaction. Les variations d'un de ces paramètres entraînent une dérive du zéro et impliquent un étalonnage périodique de l'instrument.

La figure 6.8 représente le circuit de l'analyseur et illustre les différentes parties qui le constituent. Il est composé d'une vanne 4-voies, de deux pompes, d'une cellule de réaction équipée d'un photomultiplicateur (PMT), d'un catalyseur et de trois régulateurs de débit massique (RDM). Le générateur d'ozone et l'étalon d'isoprène sont externes à l'instrument.

Selon la position de la vanne 4 voies, l'analyseur est en position de mesure comme présenté dans la figure 6.8, ou en position d'étalonnage indiqué par les traits pointillés de la vanne 4 voies.

En position de mesure, le débit d'air entrant dans l'analyseur est divisé en deux. Une fraction de cet air est aspirée par la pompe secondaire et le reste par la pompe principale. L'air aspiré par la pompe principale rencontre le mélange d'ozone et d'oxygène dans la cellule de réaction où a lieu la réaction d'ozonolyse de l'isoprène et la détection des photons résultants. Ce mélange circule ensuite dans un catalyseur permettant d'éliminer complètement l'ozone et les hydrocarbures produits. Un régulateur de débit massique est positionné avant l'évacuation et indique le débit total. Le débit du mélange d'ozone et d'oxygène est aussi mesuré par un second régulateur de débit massique. L'air aspiré par la pompe secondaire ne présente pas d'intérêt pour la mesure mais sert à maintenir une circulation dans la partie du circuit utilisé pour l'étalonnage.

En position d'étalonnage, le débit d'air est toujours divisé en deux. La fraction aspirée par la pompe secondaire est directement rejetée. Par contre, la fraction du débit aspirée par la pompe principale effectue un circuit plus long que dans la position normale. Cet air transite en premier dans le catalyseur. Cette première étape permet d'éliminer les COV naturellement présents et on obtient donc un air sans hydrocarbures, appelé "air zéro". L'étalon d'isoprène est connecté au circuit de l'analyseur via un régulateur de débit massique et une vanne simple. Ce régulateur de débit massique est calibré pour délivrer

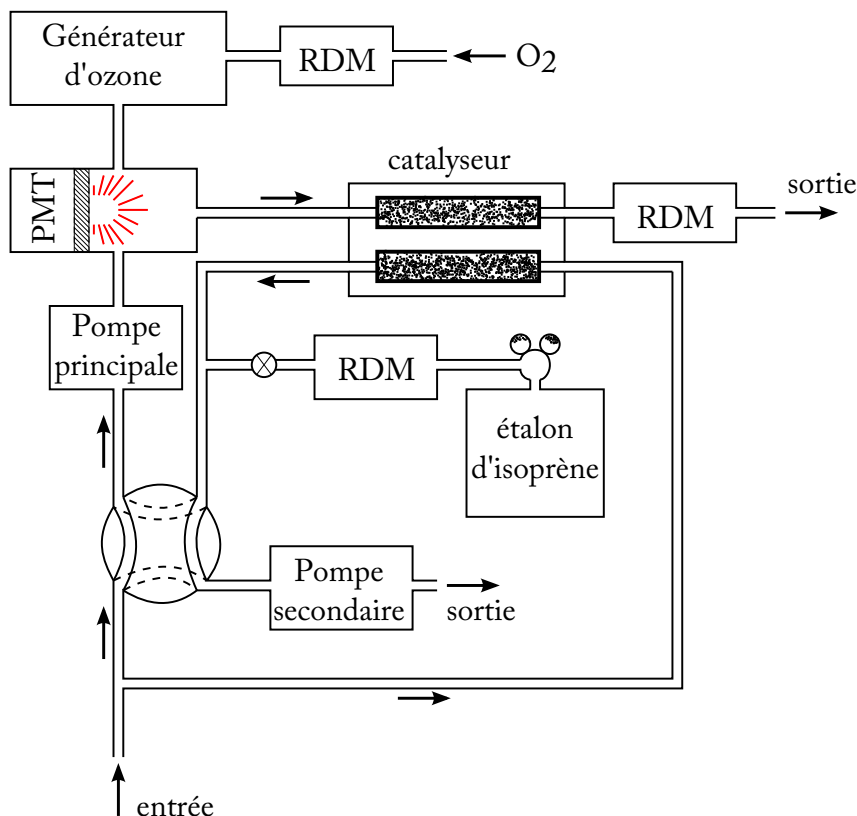


FIGURE 6.8 – Schéma de l'analyseur d'isoprène (FIS).

des débits faibles de 0 à 20 ml mn⁻¹ et ainsi obtenir des facteurs de dilution importants. Il est donc possible de créer un mélange d'air zéro et d'isoprène avec une concentration d'isoprène connue dans une gamme de 0 à 25 ppb. Ce mélange est ensuite analysé comme le serait un échantillon en position normale.

Travaux de réparation

Une partie de mon travail durant la première année de thèse a été de remettre l'analyseur FIS en état de marche et de modifier son châssis en vue d'une utilisation en avion et donc dans un rack 19". La version originale du FIS-97 se présente sous la forme d'une valise en polymère renforcée dans laquelle sont fixés les différents éléments de l'instrument comme le montre la figure 6.9. Cet instrument n'ayant pas été utilisé pendant plusieurs années, il a été nécessaire de remplacer certaines pièces comme les pompes, les tubes téflon qui constituent le circuit fluide et certains fils chauffants. Les régulateurs de débit massique ont été renvoyés chez le constructeur pour révision et étalonnage. Les éléments du circuit fluide qui ont été conservés tels que les vannes et raccords ont subi un nettoyage complet.

Le châssis de l'analyseur a été modifié pour correspondre au format 19" de la baie certifiée pour l'avion de recherche (ATR-42, SAFIRE). Cette modification a entraîné une réorganisation des éléments de l'analyseur dans un espace plus restreint. Les circuits électriques ont été entièrement refaits et certains interrupteurs remplacés pour cette nouvelle version. La figure 6.10 est une photo de l'intérieur de l'analyseur dans le nouveau châssis 19" en métal. L'interface utilisateur a été placée en face avant comme le montre la figure 6.11.



FIGURE 6.9 – Photo du FIS en version originale (FIS-97).

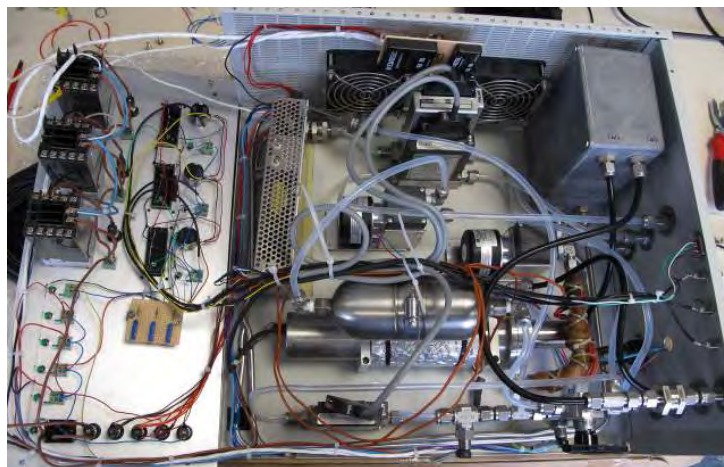


FIGURE 6.10 – Photo du FIS remis en état et adapté dans un rack 19".



FIGURE 6.11 – Photo de la face avant du FIS remis en état et adapté dans un rack 19".

Ces travaux sur l'analyseur FIS ont été menés en parallèle avec la réalisation de ME-DEE. Ils ont commencé dès le début de ma thèse à la fin de l'année 2009 et ont été terminés pour participer la première campagne de mesure à l'été 2010.

6.5 Résultats

Les mesures effectuées du 1^{er} au 6 août 2010 à l'OHP sont présentées ici. Cette période correspond au fonctionnement optimal de l'ensemble des capteurs.

6.5.1 Conditions de la campagne

Les conditions météorologiques durant la campagne ont été caractéristiques du climat estival sec de ce site, c'est à dire des journées fortement ensoleillées avec une couverture nuageuse très faible comme le montrent les figures 6.5 et 6.6. Les températures de l'air mesurées sur la station sont comprises entre 15 °C la nuit et 25 °C durant la journée. Le rayonnement net atteint chaque jour, en milieu de journée, des valeurs de l'ordre de 700 W m⁻².

L'humidité relative (HR) décrit un cycle diurne avec un maximum la nuit et un minimum en milieu de journée. Des maxima sont atteints pour les nuits du 1^{er} au 3 août à 75 % HR. Une tendance à la baisse est observée pour le reste de la période du 4 au 6 août avec un minimum atteint pour la journée du 6 août à 20 % HR.

L'intensité du vent est la plupart du temps comprise entre 2 et 6 m s⁻¹. Un maximum de vent est observé pour la journée du 5 août avec une moyenne atteignant 8 m s⁻¹ en fin de journée. Les directions de vent pour cette période sont semblables aux conditions présentées dans la section 6.3. Les conditions de mistral sont largement dominantes (vents de nord-ouest et de nord). La figure 6.12 présente les séries temporelles de ces différents paramètres moyennés sur une demi-heure pour la période du 1^{er} au 6 août. Les concentrations d'ozone sont aussi présentées. Le niveau de fond est d'environ 40 ppb avec une augmentation des concentrations de 10 à 15 ppb pour les après-midis du 2 et 4 août. Un maximum d'ozone est observé pour la journée du 1^{er} août et est expliqué par un vent de sud pendant cette journée qui amène un air chargé en polluants par les agglomérations marseillaises et d'Aix-en-provence.

6.5.2 Mesures de flux

La préparation des données brutes de la station de mesure de flux est décrite à la section 4.5. Durant la campagne, les flux de chaleur sensible, de chaleur latente et de CO₂ ont été calculés par la technique EC selon les relations données à la section 2.3.5. Les flux d'isoprène ont été mesurés avec la technique DEC grâce au système MEDEE et pour une période restreinte par EC à la fréquence maximum d'utilisation de l'analyseur d'isoprène, c'est à dire à une fréquence de 1 Hz. La mesure du flux d'isoprène en utilisant une deuxième méthode (EC) permet une première validation des ordres de grandeurs des mesures de flux avec le système MEDEE.

Les flux d'isoprène mesurés par DEC sont calculés selon l'équation :

$$F_{iso.} = \frac{M_{iso.}}{M_a} \bar{\rho} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} (w' \chi'_{iso.})_j \quad (6.6)$$

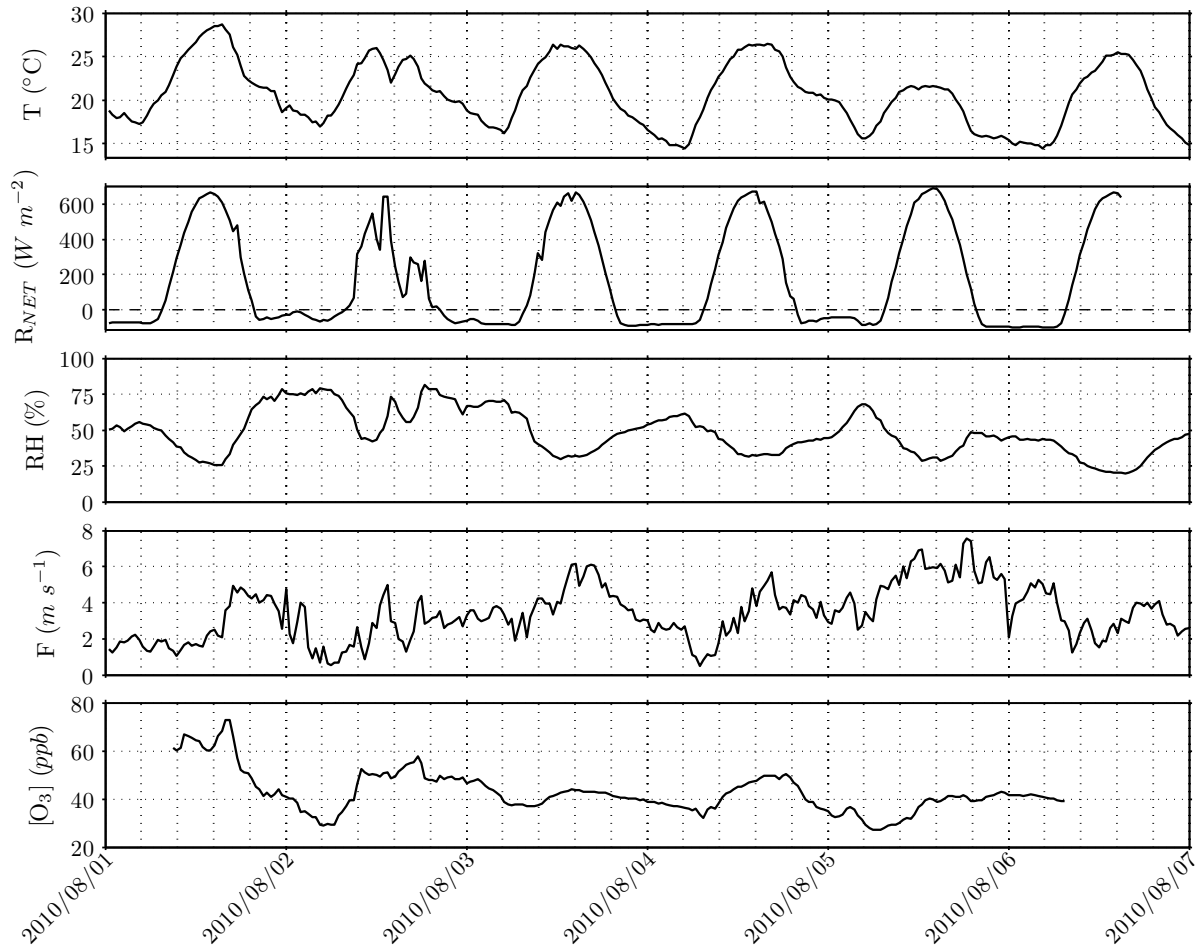


FIGURE 6.12 — Conditions météorologiques durant la campagne du 1^{er} au 6 août 2010. Les paramètres représentés sont, de haut en bas, la température, le rayonnement net, l'humidité relative, l'intensité du vent (F) et les concentrations d'ozone. Les données présentées ici sont des moyennes sur 30 mn.

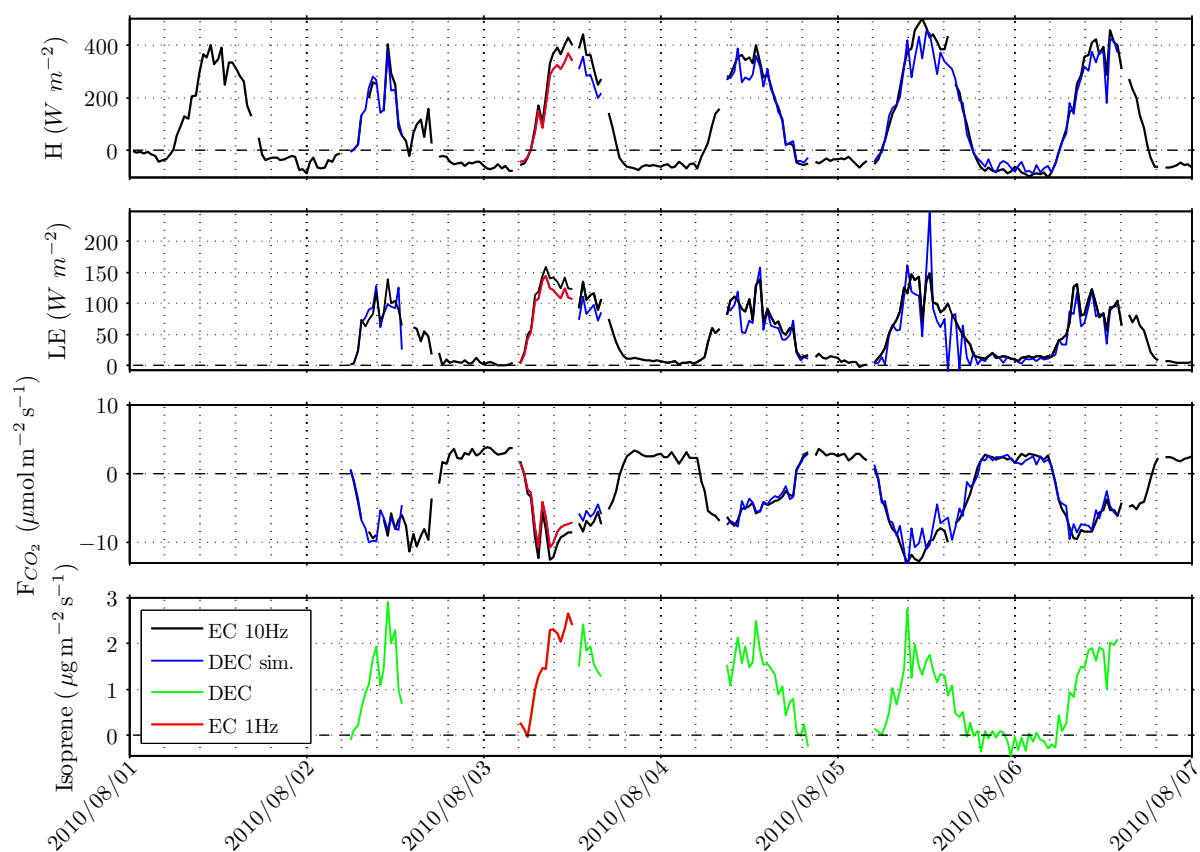


FIGURE 6.13 – Flux de chaleur sensible, chaleur latente, de CO_2 et d'isoprène mesurés durant la campagne sur la période du 1^{er} au 6 août 2010. Les flux ont été calculés par EC à 10 Hz, par DEC simulée, par DEC, et par EC à 1 Hz, chaque méthode est représentée respectivement par les courbes de couleur noire, bleue, verte et rouge.

avec χ'_{iso} , les fluctuations du rapport de mélange d'isoprène (ppb) et M_{iso} , la masse molaire de l'isoprène et n le nombre d'échantillons. Les flux sont exprimés en $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Les flux ont été calculés sur des périodes de 30 mn pour la DEC et pour l'EC. Avec un intervalle entre deux échantillons de 11,5 s le système MEDEE collecte environ 155 valeurs sur une période de 30 mn ($n \simeq 155$).

L'ensemble des flux mesurés est présenté dans la figure 6.13. Les flux de chaleur sensible et de chaleur latente décrivent des cycles journaliers avec des valeurs maximales en milieu de journée et minimales pendant la nuit. Les flux de chaleur sensible oscillent entre 300 - 500 W m^{-2} en milieu de journée et jusqu'à -50 W m^{-2} la nuit. Le flux de chaleur latente représente environ le tiers du flux de chaleur sensible avec des valeurs comprises entre 0 et 150 W m^{-2} .

Les flux de CO_2 décrivent aussi des cycles journaliers avec des valeurs négatives pendant la journée ce qui correspond à une capture de CO_2 par la végétation, et des valeurs positives et stables la nuit, ce qui traduit la respiration de la végétation. Les valeurs des flux de CO_2 sont comprises entre 4 et -12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Avant de présenter les flux d'isoprène, l'effet d'une capture relativement longue des échantillon pour la méthode DEC a été étudié, de même que l'effet d'une fréquence de mesure de 1 Hz pour les mesure en EC.

Comparaison des flux EC et DEC simulée

Les électrovannes de prélèvement du système MEDEE utilisées pour cette campagne possèdent un diamètre intérieur de 6 mm et ont entraîné une perte de charge importante lors de la capture des échantillons. Le temps de capture d'un échantillon a été estimé à 0,6 s dans cette configuration. La conséquence d'un temps de capture long est une perte d'information sur les petites échelles qui contribuent au flux et donc une sous-estimation du flux.

Dans le but d'évaluer l'impact des caractéristiques du système DEC et en particulier du temps de capture de l'échantillon, les flux de chaleur sensible, chaleur latente et flux de CO_2 ont été recalculés en simulant un échantillonnage DEC à partir des séries temporelles complètes à 10 Hz. Les calculs simulant la DEC ont été faits en prenant en compte les caractéristiques du système MEDEE dans des routines Matlab que j'ai développées.

Les flux par DEC simulée sont représentés en bleu sur la figure 6.13. Si l'on compare les flux par DEC simulée et par EC pour la chaleur sensible, la chaleur latente et le CO_2 , on remarque que les flux par DEC simulée présentent une dispersion plus importante et sont généralement plus faibles en valeur absolue que les flux par EC. Cette comparaison est présentée sous forme de diagramme de dispersion dans la figure 6.14a pour la chaleur sensible, dans figure 6.14c pour la chaleur latente et la figure 6.14e pour le CO_2 . Une régression linéaire est présentée sur chaque diagramme. Les coefficients de corrélation entre les deux techniques sont proches de 1 et les offsets sont faibles. La sous-estimation des flux par la DEC simulée est mise en avant par la valeur de la pente de la régression linéaire. Les coefficients de pente sont respectivement de 0,86, 0,91 et 0,90 pour les flux de chaleur sensible, chaleur latente, et flux de CO_2 .

Ces résultats confirment la perte d'informations sur le flux liée au temps de prélèvement trop long et permettent d'estimer l'impact sur les flux DEC. À partir de ces comparaisons, il est possible de déterminer une correction à appliquer sur les flux d'isoprène si l'on fait l'hypothèse que les échelles de la turbulence masquées par un temps d'échantillonnage long contribuent de la même façon pour les flux de chaleur latente ou flux de CO_2 que pour

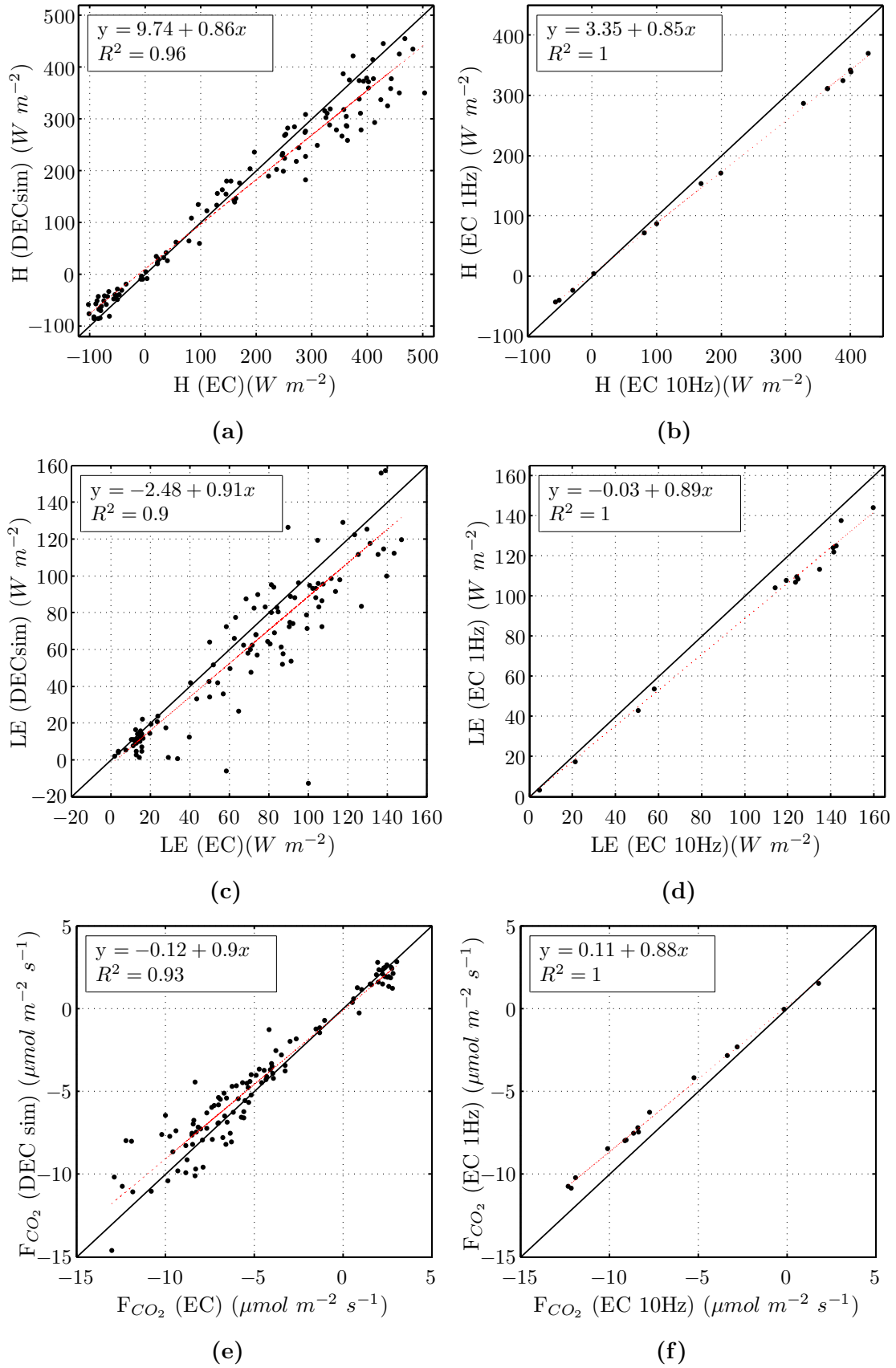


FIGURE 6.14 – Comparaison des flux de chaleur sensible, chaleur latente et CO_2 calculés par DEC simulée et par EC simulée à 1 Hz aux flux par EC. Dans chaque diagramme de dispersion, la droite noire correspond à la droite 1:1 et la droite rouge à la régression linéaire.

les flux d'isoprène. Ainsi pour corriger la sous-estimation engendrée par la configuration du système MEDEE, les flux d'isoprène ont été majorés de 10% en accord avec la sous-estimation observée sur les comparaisons des flux par EC et DEC simulée de chaleur latente et de CO₂.

Comparaison des flux EC à 10 Hz et EC simulée à 1 Hz

Pour une demi journée le 3 août, l'analyseur d'isoprène a été utilisé en EC avec une fréquence de mesure de 1 Hz. Une ligne de prélèvement en Téflon a été connectée à l'analyseur avec la prise d'air située au niveau de la mesure de vent par l'anémomètre sonique. Afin d'estimer la perte d'information sur les flux engendrée par une fréquence de mesure faible, les flux de chaleur latente, chaleur sensible et CO₂ ont été calculés en simulant une fréquence de mesure de 1 Hz. Les comparaisons sont présentées dans les figures 6.14b, 6.14d et 6.14f.

De manière similaire à la comparaison des flux par DEC simulée et des flux par EC, on remarque ici une sous-estimation des flux par EC à 1 Hz par rapport aux flux par EC 10 Hz. Les coefficients de pente de la régression linéaire sont respectivement de 0,85, 0,89 et 0,88 pour les flux de chaleur sensible, chaleur latente, et flux de CO₂. En prenant la même hypothèse, on peut considérer qu'il existe une sous-estimation des flux d'isoprène d'environ 12 %.

Flux d'isoprène et taux d'émission standard

Les flux d'isoprène décrivent un cycle journalier avec des valeurs de l'ordre de 1,5 à 3 $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en milieu de journée. Pendant la nuit les flux sont nuls ou faiblement négatifs. Les flux mesurés par EC à 1 Hz sont en accord avec les flux mesurés par DEC en terme de tendance et d'ordre de grandeur.

Afin d'être comparés avec les flux d'isoprène rapportés dans la littérature, ces résultats ont été normalisés en utilisant l'algorithme G93 pour l'isoprène (*Guenther et al.*, 1993; *Guenther*, 1997) aux conditions standard de 30°C pour la température et de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le PAR.

Cette normalisation décrite à la section 3.4 est rappelée ici :

$$\text{Flux d'isoprène normalisé} = \frac{\text{flux d'isoprène mesuré}}{C_T C_L} \quad (6.7)$$

On prendra pour C_L :

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L_{PAR}}{\sqrt{1 + \alpha^2 L^2}}, \quad (6.8)$$

avec α ($= 0,0027$) et C_{L1} ($= 1,066$) des coefficient empiriques et L_{PAR} (en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) est le flux de PAR.

Et pour C_T :

$$C_T = \frac{\exp\left(\frac{C_{T1}(T-T_S)}{RTT_S}\right)}{C_{T3} + \exp\left(\frac{C_{T2}(T-T_M)}{RTT_S}\right)}, \quad (6.9)$$

où R est la constante des gaz parfaits ($= 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), C_{T1} ($= 95000 \text{ J mol}^{-1}$), C_{T2} ($= 230000 \text{ J mol}^{-1}$), C_{T3} ($= 0,961 \text{ J mol}^{-1}$) sont des coefficients empiriques, T (K)

est la température des feuilles et T_S (K) est la température aux conditions standard, ici 30 °C.

Pour la normalisation, la température de l'air mesurée au sommet du mât par l'anémomètre sonique a été utilisée à la place de la température des feuilles qui n'a pas pu être mesurée pendant la campagne. La température au sommet de la canopée a été estimée à l'aide des relations qui décrivent le profil des flux dans la couche de surface et le résultat donne une différence inférieure à 1 °C. Cette faible différence est due aux conditions de vent pendant la période de mesure. L'utilisation de la température au niveau du mât a donc été considérée comme une approximation acceptable. L'effet de l'utilisation d'une température plus faible que la température des feuilles a été calculé pour plusieurs valeurs. Le flux normalisé est plus fort de 6 % pour une sous-estimation de la température de 0,5 °C et de 12 % pour une différence de 1 °C.

Les valeurs de PAR utilisées pour la normalisation ont été mesurées sur l'échafaudage et correspondent donc au PAR total au-dessus de la canopée. Cependant une partie du feuillage de la canopée se trouve dans l'ombre et il serait plus juste d'utiliser le PAR moyen à travers la canopée. Ce paramètre nécessite l'installation de plusieurs capteurs à différents niveaux dans la canopée ce qui n'a pas été possible durant la campagne. Les émissions d'isoprène sont fortement dépendantes du PAR lorsque l'ensoleillement est faible mais une saturation intervient rapidement quand l'ensoleillement a atteint la moitié de son maximum (*Guenther et al.*, 1993). De plus le LAI mesuré sur le site indique une canopée relativement ouverte et peu dense. On peut donc considérer que le PAR moyen dans la canopée n'est pas inférieur à 50% du PAR total. L'utilisation du PAR total pour la normalisation entraîne une baisse de 7% du flux normalisé si l'on considère que le PAR moyen est égal à la moitié du PAR total.

En conclusion les effets de l'utilisation de la température de l'air et du PAR total se compensent partiellement dans le calcul de normalisation.

Les flux normalisés sont convertis en taux d'émission standard en utilisant le LAI et la masse de feuillage par unité de surface. Une valeur de 134,3 g m⁻² est donnée pour la masse de feuillage par unité de surface par *Simon et al.* (2005) pour une végétation similaire sur un site géographiquement proche de l'OHP. Le taux d'émission standard moyen calculé à partir des mesures de la campagne est de 40 µg g⁻¹ h⁻¹ pour la forêt de chênes pubescents à l'OHP. Dans la bibliographie, les valeurs reportées pour les émissions d'isoprène par l'espèce *Quercus Pubescens* sont 134,7, 92, 90,7 et 42 µg g⁻¹ h⁻¹) (*Simon et al.*, 2005; *Owen et al.*, 1998; *Steinbrecher et al.*, 1997; *Kesselmeier et al.*, 1998, respectivement). Or, ces résultats ont été obtenus à partir de mesures au niveau de la branche. On s'attend à obtenir un taux d'émission sensiblement plus faible pour des mesures réalisées au-dessus de la canopée à cause des pertes qui peuvent avoir lieu par dépôt sur les surfaces dans la canopée ou à cause de transformations chimiques entre la la canopée et quelques mètres au-dessus de la canopée (*Fuentes et al.*, 2000). En outre, les conditions de vent relativement fort observées sur le site peuvent aussi avoir un effet de réduction sur les taux d'émission par la végétation (*Loreto and Sharkey*, 1993). Le taux d'émission calculé à partir des mesures par DEC est légèrement inférieur aux valeurs reportées dans la littérature cependant on peut considérer qu'il y a un bon accord entre notre résultat et les résultats des autres études étant donné les conditions de mesure.

D'autre part la sous-estimation décelée sur les mesures de flux par DEC avec MEDEE lors de la campagne d'inter-comparaison à Lamasquère (section 5.2) et estimée à 14 % n'a pas été prise en compte ici. L'origine de cette sous-estimation n'étant pas connue,

il m'a semblé pertinent de ne pas l'appliquer aux flux d'isoprène mesurés pendant cette campagne pour deux raisons. D'abord à cause de la configuration du système MEDEE qui est différente pour ces deux campagnes, en particulier au niveau des électrovannes de prélèvement. Ensuite, une correction ayant déjà été appliquée sur les flux d'isoprène, il n'est pas possible de déterminer si ces deux corrections sont totalement indépendantes.

6.6 Conclusion

Le système MEDEE a été déployé lors de plusieurs campagnes de mesures en 2010 et en 2011. Les résultats de la campagne de l'été 2010 sur une forêt de chênes blancs sont présentés et analysés. Le système MEDEE a été mis en œuvre pour la caractérisation des flux de COV biogéniques sur une végétation caractéristique de la région méditerranéenne. Les mesures ont été réalisées sur la période du 1^{er} au 6 août. Durant cette période les flux d'isoprène, de chaleur sensible, de chaleur latente, de CO₂ ont été mesurés ainsi que les paramètres météorologiques : vent, rayonnement, PAR, température, humidité relative et spécifique, précipitations et concentrations d'ozone et d'oxydes d'azote. Les conditions météorologiques pendant la campagne ont été caractéristiques du climat sec et chaud du site. Des flux de chaleur sensible et des flux de chaleur latente, respectivement de 400 et de 150 W m⁻² ont été observés en milieu d'après midi. Pour les flux de CO₂ des valeurs de - 10 μmol m⁻² s⁻¹ étaient typiquement atteintes en milieu de journée.

Pour l'isoprène, un taux d'émission standard moyen de 40 μg g⁻¹ h⁻¹ (à 30 °C et 1000 μmol m⁻² s⁻¹) a été obtenu. Ce résultat est en deçà mais proche des valeurs reportées dans la littérature pour des végétations similaires étant données les conditions de mesures. Une étude de l'empreinte du flux en utilisant le modèle de *Kljun et al.* (2004) a montré une zone de contribution d'extension de 153 m dans la direction du vent pour des conditions de vent fort et de 72 m dans des conditions de vent faible, recouverte par la forêt de chênes pubescents. L'ensemble des paramètres mesurés pendant cette période ont servi pour établir la paramétrisation des flux d'isoprène. Cette paramétrisation fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 7

Modélisation, réseau de neurones artificiels

7.1 Introduction

Les processus biologiques, physiologiques et physiques qui entrent en jeu dans la production, l'émission et le transport des composés organiques volatils depuis les tissus vers et au-delà de la canopée sont nombreux et certains ne sont pas ou sont peu connus. Même si certains processus apparaissent prépondérants et permettent d'expliquer une grande partie de ce système, il est difficile de construire un modèle déterministe intégrant les lois physiques de chacun des processus. L'utilisation d'un réseau de neurones artificiels relève d'une autre approche, l'approche statistique. Partant du principe que les phénomènes contrôlant les émissions de COV au niveau de la plante sont complexes et non linéaires (phénomènes à seuil) et que les données d'observation sont rares, il est fait appel à un outil appelé réseau de neurones pour déterminer statistiquement l'importance de chaque paramètre sur le flux de COV et trouver la meilleure relation non-linéaire entre ces paramètres et les émissions. Cette approche a déjà été utilisée pour modéliser les flux de NO par les sols (*Delon et al.*, 2007) et montrent des résultats encourageant en comparaison avec les modèles existants.

7.2 L'approche statistique, les réseaux de neurones artificiels

7.2.1 Concept

Le réseau de neurones est un outil mathématique puissant permettant de trouver une relation non-linéaire entre des variables et un résultat. Un neurone est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. On appelle "entrées" les variables de cette fonction et "sorties", la valeur de la fonction. Le neurone est donc avant tout un opérateur mathématique dont on peut calculer la valeur à partir de sa formule. Il existe de nombreux types de réseaux de neurones avec chacun leurs spécificités et leurs limitations. Nous allons décrire ici uniquement le fonctionnement du réseau de neurones de type perceptron multi-couche qui a servi pour cette étude, et qui se trouve aussi être le plus généralement utilisé.

C'est une fonction non-linéaire, ici une tangente hyperbolique, d'une combinaison linéaire d'entrées qui caractérise le neurone :

$$y = \tanh \left(\sum_{i=1}^n w_i v_i \right). \quad (7.1)$$

Les variables d'entrée du neurone sont notées v_i et les w_i sont les paramètres ajustables ou poids. Le neurone réalise en fait une somme pondérée (neurone sommateur) suivie d'une fonction d'activation non linéaire. C'est l'association de plusieurs éléments simples de ce type sous forme de réseau qui permet de réaliser des fonctions utiles en modélisation ou autres applications.

Dans notre cas, le réseau de neurones est non bouclé. Il réalise une fonction algébrique de ses entrées par composition de fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Schématiquement ce réseau est représenté par un ensemble de neurones connectés entre eux avec un sens allant des entrées vers la ou les sorties. Il n'y a pas de retour en arrière de l'information. La structure du perceptron multi-couche (figure 7.1) comprend des entrées, une couche de neurones cachés et des neurones de sortie, les neurones n'étant pas connectés entre eux.

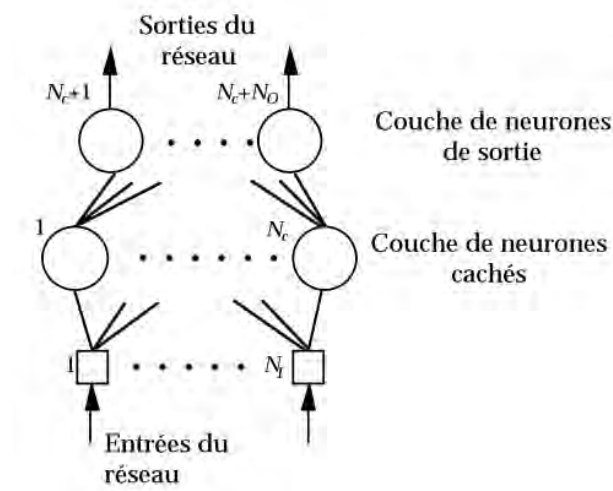


FIGURE 7.1 – Schéma d'un perceptron multicouche.

Les réseaux de neurones non bouclés sont des objets statiques c'est à dire que si les entrées sont indépendantes du temps, les sorties le sont aussi. Leur application principale est l'approximation de fonctions non linéaires, de modélisation de processus statiques ou de classification.

7.2.2 Avantages

La propriété remarquable des réseaux de neurones tels que nous venons de les décrire est leur qualité d'approximateurs universels parcimonieux. C'est cette propriété qui est à l'origine de leur intérêt pratique dans des domaines divers. On peut définir succinctement la propriété d'approximation de la manière suivante : *Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace*

de ses variables, par un réseau de neurones comportant une couche de neurones cachés en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire (Hornik et al., 1989). Les réseaux de neurones ne sont pas les seuls outils possédant cette propriété. Il existe d'autres familles de fonctions paramétrées telles que les ondelettes, les fonctions radiales, ou encore les fonctions splines.

Ce qui rend les réseaux de neurones uniques réside dans le caractère parcimonieux de l'approximation. À précision égale, les réseaux de neurones nécessitent moins de paramètres ajustables que les approximateurs universels couramment utilisés. En effet le nombre de poids varie linéairement avec le nombre de variables de la fonction alors qu'il varie exponentiellement pour la plupart des autres approximateurs (Hornik et al., 1994). Il sera donc préférable d'utiliser un réseau de neurones dès que le problème fait intervenir plus de deux variables. Cette propriété de parcimonie peut se comprendre lorsque l'on compare les différentes méthodes d'approximation. Quand celle-ci est une combinaison linéaire de fonctions élémentaires fixées (monômes ou gaussiennes), seuls les coefficients de la combinaison sont ajustables alors que lorsque l'approximation est une combinaison linéaire de fonctions non linéaires à paramètres ajustables, c'est à dire un perceptron multi-couches, ce sont à la fois les coefficients de la combinaison et la forme des fonctions que l'on combine qui sont ajustés. Le fait de pouvoir ajuster la forme des fonctions que l'on combine confère plus de souplesse et permet d'utiliser un nombre plus petit de paramètres.

En pratique, les réseaux de neurones sont utilisés lorsque l'on cherche une forme mathématique de la relation entre un ensemble de mesures de variables d'un processus et le résultat de ce processus. On parle alors de modélisation "boîte noire" car les mesures dont on dispose sont en nombre fini, qu'elles sont certainement entachées de bruit et que toutes les variables qui déterminent le résultat du processus ne sont pas forcément mesurées. On ne pourra obtenir la vraie fonction qui décrit ce processus qu'avec un nombre infini de mesures du résultat pour chaque valeur possible des variables. C'est donc une approximation à partir des mesures disponibles de cette fonction que l'on va rechercher à l'aide du réseau de neurones, si cette fonction est non linéaire. On obtient cette approximation en estimant les paramètres du réseau de neurones au cours de la phase dite d'apprentissage. C'est là que la propriété de parcimonie est avantageuse, en effet, le nombre de mesures nécessaires pour estimer les paramètres de manière significative est d'autant plus grand que le nombre de paramètres est grand. De cette manière, à précision égale, le réseau de neurones nécessite moins de données qu'une régression linéaire multiple pour modéliser une grandeur. On aura donc à nombre de données égal, une approximation plus précise avec un réseau de neurones plutôt qu'une régression multiple.

On peut donc dire que le réseau de neurones fait un meilleur usage des mesures disponibles que les méthodes de régression non linéaire conventionnelles. Ce gain est d'autant plus remarquable lorsque le processus à modéliser dépend de nombreuses variables en ayant en tête que le nombre de paramètres varie exponentiellement pour les méthodes conventionnelles.

Bien que le vocabulaire associé au réseau de neurones soit très anthropomorphique, cette méthode relève bien du domaine des statistiques.

7.2.3 Mise en œuvre du réseau de neurones

Quatre étapes sont identifiées pour mettre en œuvre un réseau de neurones. D'abord le choix de l'architecture, puis le choix de l'ensemble d'apprentissage, la phase d'apprentissage et enfin la validation.

Le choix de l'architecture du réseau permet de définir les entrées externes et le nombre de neurones cachés afin que le réseau soit capable de reproduire ce qui est déterministe dans les données. Le nombre de paramètres ajustables (poids) du réseau de neurones est un élément clé de la réussite de l'application. Un trop grand nombre de neurones et donc de poids rend le réseau trop souple et va donc créer des oscillations entre les points d'apprentissage ou un ajustement trop important sur le bruit présent dans les données, c'est le sur-apprentissage. Dans ce cas les propriétés d'interpolation ou de généralisation seront mauvaises. À l'inverse, si le nombre de poids est trop petit, le réseau sera trop rigide et ne sera pas non plus capable de reproduire la partie déterministe des données. Le choix du nombre de neurones dépend uniquement du nombre d'entrées du réseau.

Le jeu de données disponible doit être séparé en deux ensembles. Le premier ensemble est dédié à la phase d'apprentissage et le second à la phase de validation. La sélection des données se fait de façon aléatoire pour obtenir une distribution statistique identique et une homogénéité des deux ensembles.

La phase d'apprentissage correspond à l'estimation des paramètres de la régression non linéaire à partir des données. Dans cette étape, le calcul des poids est effectué en vue de minimiser l'erreur d'approximation sur les points de l'ensemble d'apprentissage.

Une fois la phase d'apprentissage terminée, la qualité du réseau obtenu est vérifiée par comparaison avec les données de l'ensemble de validation. Cette étape permet de déterminer sa capacité à modéliser le phénomène étudié et ses performances sur un ensemble de données différent de l'ensemble d'apprentissage.

Les étapes d'apprentissage supervisé et de validation font appel à des méthodes spécifiques. Le but de l'apprentissage est de calculer les poids pour que les sorties du réseau soient aussi proches que possibles des mesures. Généralement, des algorithmes d'optimisation sont utilisés pour l'apprentissage. Leur action est de minimiser par des méthodes d'optimisation non linéaire, une fonction de coût qui représente une mesure de l'écart entre les réponses réelles du réseau et les mesures. L'optimisation est faite de manière itérative, en modifiant les poids selon le gradient de la fonction coût. Ce gradient est estimé par une méthode de rétro-propagation spécifique au réseau de neurones. Les poids sont initialisés aléatoirement avant l'apprentissage puis modifiés itérativement jusqu'à obtenir un compromis entre la précision de l'approximation sur l'ensemble d'apprentissage et sur l'ensemble de validation.

7.3 La paramétrisation des flux d'isoprène

7.3.1 Élaboration de l'équation

Les processus impliqués dans les émissions biogéniques d'isoprène sont nombreux et pour la plupart peu compris (section 3.2). Cependant certains paramètres environnementaux ont été identifiés comme jouant un rôle prépondérant sur les émissions à court terme et à long terme. À court terme, la température des feuilles et le rayonnement (PAR) ont un rôle majeur. À moyen ou plus long terme, la disponibilité en eau et les stress divers

peuvent modifier les émissions.

Dans le but d'utiliser un réseau de neurones pour établir une modélisation des flux d'isoprène, plusieurs paramètres environnementaux ont été mesurés durant les campagnes de mesures. Ces variables ont été choisies d'après les connaissances sur les flux de COV biogéniques et en fonction de l'instrumentation disponible. Les données utilisées ici proviennent de la campagne de mesure effectuée à l'OHP durant l'été 2010. Les données mesurées du 2 au 6 août constituent un total de 127 lignes. Chaque ligne correspond à une moyenne sur une demi-heure des différentes variables et du flux d'isoprène. Ce jeu de données a ensuite été séparé en deux ensembles, un ensemble d'apprentissage de 77 lignes et un ensemble de validation de 50 lignes. Les deux ensembles ont été construits de telle façon que chaque ensemble conserve la même distribution statistique et ce, en calculant la distance de Kullback-Liebler (*Kullback and Leibler*, 1951). Le type de réseau de neurones utilisé dans cette étude est un perceptron multi couches comme décrit dans la section 7.2, c'est un réseau non bouclé avec une fonction d'activation de type tangente hyperbolique. Le logiciel utilisé est Neuro One v6.12 de Netral (Issy les Moulineaux France, www.netral.com). L'architecture du réseau de neurones a été choisie selon les critères décrits dans la section précédente.

Parmi les différentes variables mesurées, celles qui ont été considérées a priori pour l'élaboration du modèle sont :

- La température de l'air
- L'ensoleillement (Rayonnement global, PAR)
- L'humidité de l'air
- Le flux de chaleur sensible
- Le flux de chaleur latente
- Le flux de CO₂
- L'intensité du vent

Afin de déterminer les variables d'entrée pertinentes pour la modélisation, plusieurs modèles ont été testés avec des combinaisons de variables d'entrée différentes. Un premier modèle a été créé avec comme entrées la température de l'air et le PAR. Ces deux paramètres ayant un rôle prédominant d'après la littérature, ce premier modèle constitue une référence pour l'évaluation des autres modèles créés avec d'autres combinaisons d'entrées mais toujours le même jeu de données. L'objectif est de trouver le ou les paramètres qui permettront d'obtenir un modèle plus performant que le modèle de référence. Les autres modèles ont été créés en conservant ces deux entrées et en ajoutant une ou plusieurs entrées parmi les variables listées ci-dessus.

Les variables humidité de l'air et intensité du vent n'ont pas été retenues car elles ne présentent pas de corrélation apparente avec les flux d'isoprène et ne permettent pas d'améliorer la performance du modèle. Les flux de chaleur sensible présentent une corrélation avec les flux d'isoprène mais sont aussi fortement corrélés avec la température et le PAR, c'est pourquoi l'ajout de ce paramètre n'apporte que peu d'information supplémentaire au modèle et n'est donc pas nécessaire. Les flux de chaleur latente et de CO₂ sont respectivement fortement corrélés et anti-corrélés, pendant la journée, aux flux d'isoprène et l'ajout d'un de ces deux paramètres comme entrée au modèle améliore sensiblement ses performances. L'ajout simultané des deux paramètres n'apporte pas d'amélioration significative et dans un souci de limitation du nombre d'entrées du modèle pour faciliter son

utilisation, un seul paramètre a été retenu. Les performances du modèle étant augmentées de manière similaire avec l'utilisation du flux de chaleur latente ou du flux de CO_2 , des critères physiques et biologiques ont été considérés pour le choix du paramètre à retenir. En effet, bien que le flux de CO_2 soit lié à la capture de CO_2 pour la photosynthèse ou à la respiration et donc représentatif de l'activité de la plante, il s'agit d'un flux opposé au flux d'isoprène pendant la journée. Le flux de CO_2 ne fait pas intervenir les mêmes processus physiques puisqu'il s'agit d'une absorption. Il est aussi fortement anti-corrélé avec le PAR ce qui signifie qu'une partie de l'information apportée par l'utilisation du flux de CO_2 diurne est redondante si le paramètre PAR est déjà utilisé comme entrée par le modèle. D'autre part, le flux de chaleur latente a pour principale origine l'évapo-transpiration des plantes dans des milieux secs et constitue donc une source de gaz trace (vapeur d'eau) pour l'atmosphère comme pour le flux d'isoprène. Dans le cas du CO_2 comme dans le cas de la chaleur latente, l'ouverture des stomates sur la surface des feuilles intervient de manière quasi-similaire. Le flux de chaleur latente est un paramètre directement disponible dans les modèle de surface tandis que le flux de CO_2 fait intervenir un travail supplémentaire de modélisation ce qui peut rendre l'implémentation de l'algorithme obtenu difficile dans un modèle de l'atmosphère.

Les variables d'entrées retenues pour le réseau de neurones pour ces travaux sont la température de l'air, le PAR et le flux de chaleur latente. Ce choix est lié au jeu de données d'observations utilisé pour l'apprentissage du réseau de neurones. D'autres liens entre le flux d'isoprène et les variables environnementales peuvent apparaître lors de l'utilisation d'un jeu de données plus important et il sera nécessaire d'étudier à nouveau la pertinence des paramètres d'entrée lors d'une nouvelle phase d'apprentissage avec un jeu de données étoffé. Une représentation schématique de l'architecture du réseau de neurones utilisé ici est donnée par la figure 7.2.

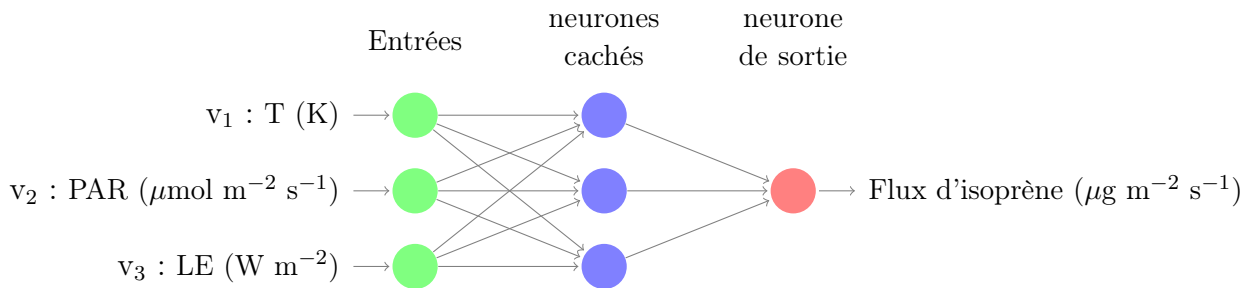


FIGURE 7.2 – Schéma du réseau de neurones

Le choix du nombre de neurones cachés est déterminant pour éviter un surapprentissage (ou overfitting) lorsque le nombre de neurones est trop grand ou à l'inverse une rigidité trop importante lorsque ce nombre est trop petit. Ici les meilleurs résultats ont été obtenus avec une couche comportant 3 neurones cachés. La règle de Vapnik–Chervenenkis (*Vapnik, 1995*) stipule que la dimension de l'ensemble d'apprentissage doit être 3 à 10 fois plus grande que le nombre de neurones cachés multiplié par le nombre de variables d'entrée. C'est le cas ici puisque le nombre d'entrées est de trois, de même pour le nombre de neurones cachés : $3 \times 3 \times 10 > 77 > 3 \times 3 \times 3$.

Les données d'entrée sont normalisées selon l'équation 7.2 pour avoir le même ordre de grandeur. Cette étape évite une sous-estimation artificielle des variables exprimées dans

un ordre de grandeur très petit par rapport aux autres variables.

$$\begin{aligned}
 v_{1,norm} &= x_1 + x_2 \times v_1 \\
 v_{2,norm} &= x_3 + x_4 \times v_2 \\
 v_{3,norm} &= x_5 + x_6 \times v_3
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Le flux de chaleur latente est noté v_1 , la température de l'air v_2 et le PAR v_3 . Les coefficients de normalisation x_i sont donnés dans le tableau 7.1.

Coefficients de normalisation	
x_1	-1,61310775180151
x_2	0,0223965181223205
x_3	-76,2194732422344
x_4	0,259066263123139
x_5	-1,21103470958622
x_6	0,00117051373138958

TABLE 7.1 – *Coefficients de normalisation des entrées du réseau de neurones.*

Lors de l'apprentissage, le nombre de modifications des valeurs des poids ou nombre d'époques est de 100. Dix initialisations de poids différentes ont été testées pour chaque modèle. Cette configuration (100 époques, 10 initialisations) a été testée plusieurs fois pour éviter une solution locale. Le modèle utilisé est statique puisque les données d'entrées ne sont pas dépendantes les unes des autres.

La sélection du meilleur modèle a été faite selon plusieurs critères. Le coût de généralisation doit être minimum. La moyenne quadratique de l'erreur sur l'ensemble d'apprentissage et celle sur l'ensemble de validation doivent être minimum et identiques ou presque. La solution retenue présente un coefficient de détermination R^2 de 0,91 sur l'ensemble d'apprentissage, un coût d'apprentissage de 0,274, un coût de validation de 0,399, un coût de généralisation de 0,365, une corrélation de 0,956 et une homogénéité de 0,962.

L'algorithme retenu, présenté par l'équation 7.3 permet donc de calculer les flux d'isoprène en $\mu g \ m^{-2} \ s^{-1}$ à partir des données d'entrées.

$$Flux_{isoprène} = w_{12} + \sum_{i=13}^{15} w_i \tanh(HO_{i-13}) \tag{7.3}$$

avec HO_j tel que :

$$\begin{aligned}
 HO_0 &= w_0 + \sum_{i=1}^3 w_i v_{i,norm} \\
 HO_1 &= w_4 + \sum_{i=5}^7 w_i v_{i-4,norm} \\
 HO_2 &= w_8 + \sum_{i=9}^{11} w_i v_{i-8,norm}
 \end{aligned}$$

Poids	
w_0	-0,339475845170435
w_1	-0,17030614931277
w_2	0,78774016659239
w_3	-0,221062517378467
w_4	0,149107679517926
w_5	0,127188361453804
w_6	-0,679557954940782
w_7	0,0375815421865539
w_8	-0,277928473684843
w_9	-0,887464525551972
w_{10}	0,55161300397208
w_{11}	1,39089113876721
w_{12}	0,107448496119554
w_{13}	-7,06897360511618
w_{14}	-9,24780459505085
w_{15}	-1,29053058451672

TABLE 7.2 – *Tableau des poids du réseau de neurones*

Les poids w_i sont donnés dans le tableau 7.2.

Une comparaison des flux mesurés par rapport au flux calculés par le réseau de neurones est représentée dans la figure 7.3. L'ensemble des 127 lignes du jeu de données sont présentées ici.

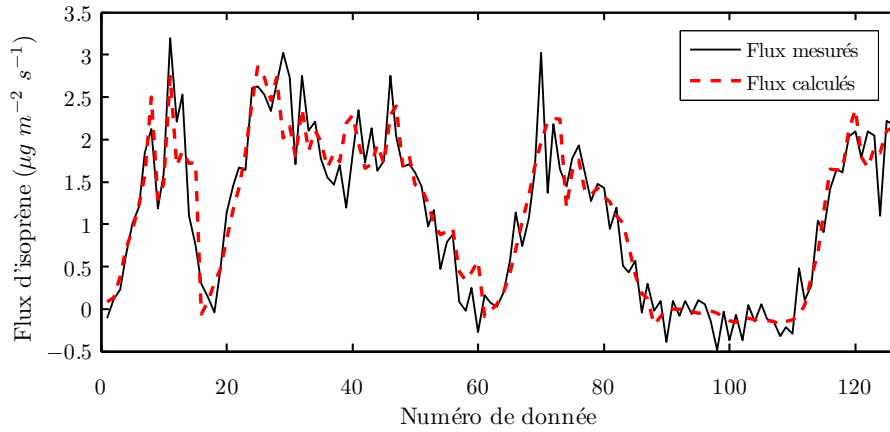


FIGURE 7.3 – *Flux d'isoprène mesurés et flux d'isoprène calculés par le réseau de neurones. Données de la campagne de mesure à l'OHP du 2 au 6 août 2010.*

Cette figure illustre la capacité du réseau de neurone à reproduire les flux. On peut voir que les tendances sont bien respectées ainsi que les variations locales. D'autre part l'allure des courbes sur les lignes 90 à 110 montre que le modèle reste peu sensible au bruit présent sur les flux mesurés.

Une représentation en diagramme de dispersion est illustrée par la figure 7.4. Le coefficient de détermination est $R^2 = 0,88$ et souligne la performance du modèle sur les données d'apprentissage et de validation. La pente de la droite de régression est légèrement inférieure à 1, ce qui résulte du lissage par le modèle de certains pics observés sur

les flux mesurés.

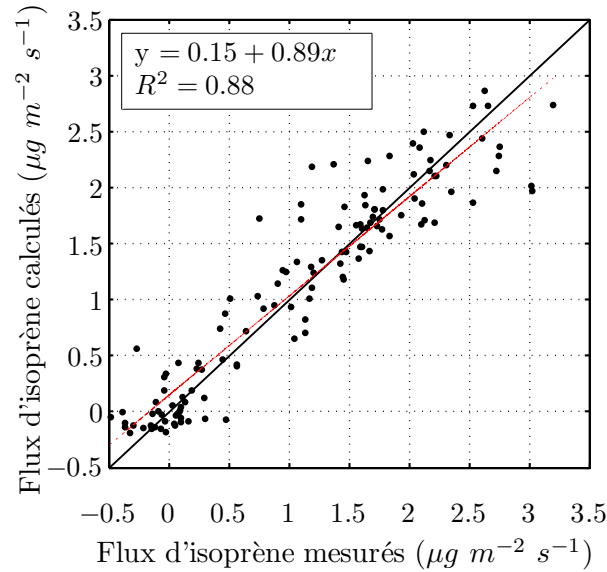


FIGURE 7.4 – Flux d'isoprène mesurés et flux d'isoprène calculés par le réseau de neurones. Données de la campagne de mesure à l'OHP du 2 au 6 août.

7.3.2 Généralisation de l'équation et comparaison avec l'algorithme G93

Pour évaluer la performance du modèle RNA, celui-ci a été testé sur la période du 1^{er} août au 1^{er} septembre 2010 où des mesures des variables d'entrée (température de l'air, PAR et flux de chaleur latente) étaient disponibles pour le site de l'OHP. Les flux d'isoprène calculés à partir de la relation donnée par le réseau de neurones ont été comparés avec les flux calculés en utilisant l'algorithme G93 (section 3.4) et le taux d'émission standard de $40 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (à 30°C et $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) déterminé pour le chêne pubescent dans la section 6.5.

La figure 7.5 présente les flux d'isoprène mesurés et calculés par les deux modèles sur la période du 1^{er} août au 7 août pour laquelle des flux mesurés d'isoprène sont disponibles. Les paramètres température, PAR et flux de chaleur latente y sont aussi représentés. La comparaison entre les flux calculés par le modèle G93 et les observations montre que la tendance journalière est bien respectée et que l'amplitude des flux est semblable. Le fait que le modèle G93 utilise le taux d'émission standard mesuré sur cette végétation et pour cette période permet un ajustement du modèle au potentiel d'émission de la source. Une surestimation des flux d'isoprène calculés par le modèle G93 est cependant présente systématiquement en fin d'après midi. En effet, les observations montrent une diminution des flux d'isoprène après 14 h avant la décroissance du PAR en fin de journée, alors que les flux calculés par le modèle G93 sont encore forts à cette période et ne diminuent que vers 16 h. L'importance du PAR dans le modèle G93 est à l'origine de cette surestimation. Cette baisse marquée des flux d'isoprène en début d'après midi est aussi observée dans une moindre mesure sur les flux de chaleur latente. Les flux calculés par l'algorithme RNA sont bien ajustés aux mesures sur cette période. La prise en compte du flux de chaleur

latente permet donc une meilleure simulation du flux l'après midi. Par contre, l'algorithme du RNA tend à surestimer les flux pendant certaines nuits. Cette surestimation semble liée à la température de l'air qui pour ces nuits (ex : la nuit du 4 au 5 août) ne présente pas de chute caractéristique en fin de journée en comparaison à la nuit du 5 au 6 août où la température a diminué fortement pour rester stable pendant le reste de la nuit. Lors de l'apprentissage du réseau de neurones, seules les observations de la nuit du 5 au 6 août ont pu être utilisées. L'algorithme du RNA semble donc souffrir d'un manque de contraintes dans les situations nocturnes lorsque la température est relativement élevée.

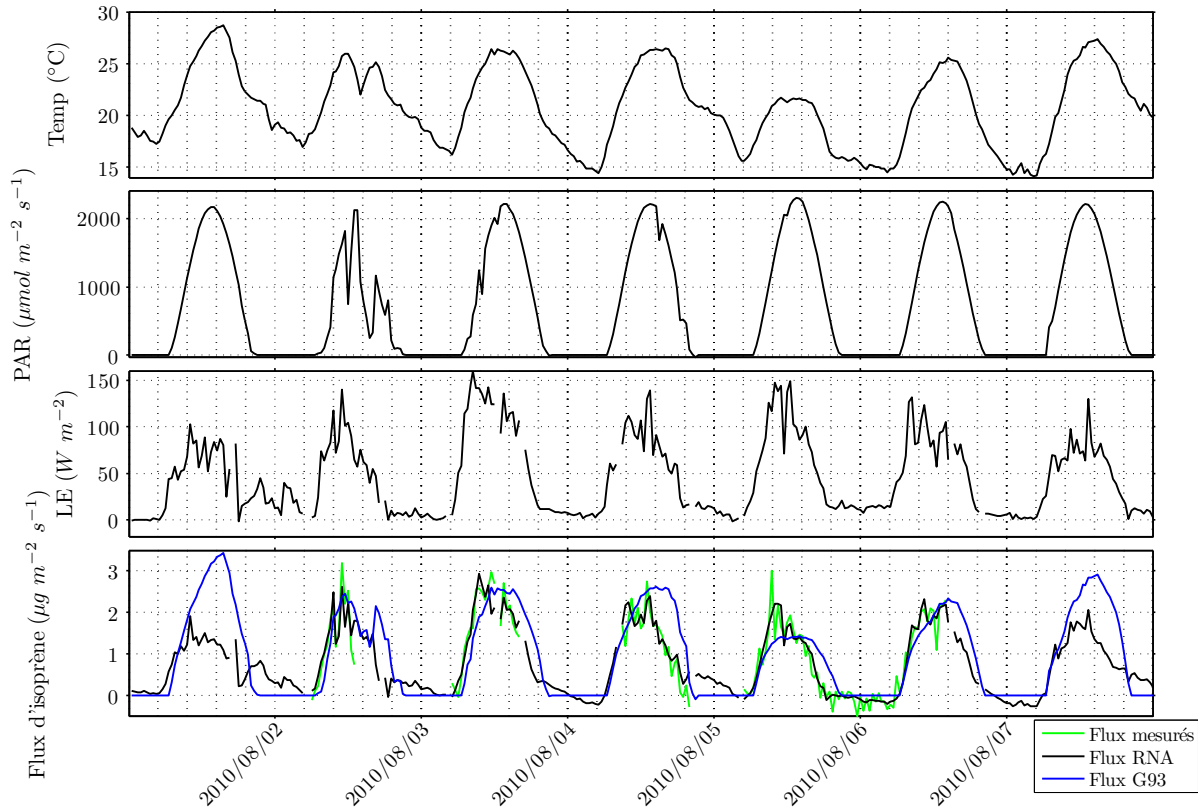


FIGURE 7.5 – Séries temporelles de température, de PAR, de flux de chaleur latente et de flux d'isoprène mesurés, calculés par le réseau de neurones, et calculés par l'algorithme G93 sur la période du 1^{er} au 7 août 2010.

Les flux calculés par les deux modèles sur la période du mois d'août sont présentés avec les paramètres d'entrée des modèles sur la figure 7.7. Pendant cette période les conditions de température et flux de chaleur latente sont plus variées que pendant la période des mesures. L'algorithme RNA est confronté à une gamme de température plus large avec des températures comprises entre 10 et 34 °C contre 15 à 28 °C. Les flux de chaleur latente atteignent des valeurs plus fortes que pour la période du 1^{er} au 7 août avec un maximum à 220 $W m^{-2}$ contre 150 $W m^{-2}$. On constate que les flux d'isoprène modélisés par l'algorithme du réseau de neurones sont cohérents avec l'évolution des paramètres environnementaux. On retrouve un cycle journalier marqué avec un maximum en début d'après midi et un minimum la nuit. On observe une baisse significative des flux d'isoprène lors d'un déficit d'ensoleillement et d'une chute de la température, par exemple pour la journée du 14 août, ce qui est en accord avec les mécanismes de production d'isoprène. Les flux calculés par l'algorithme G93 sont généralement plus forts le jour que les flux

calculés par l'algorithme du RNA. La différence entre les flux est la plus marquée en milieu de journée où les flux les plus forts calculés par l'algorithme G93 peuvent être jusqu'à quatre fois plus forts que les flux calculés par l'algorithme du RNA. Cette tendance est confirmée par un écart-type plus grand ($\sigma = 1,16 \mu g m^{-2} s^{-1}$) pour les flux G93 par rapport aux flux RNA ($\sigma = 0,82 \mu g m^{-2} s^{-1}$) sur la période du mois d'août. Le cumul des émissions d'isoprène calculées avec l'algorithme G93 est 30 % plus grand que celui des émissions modélisées à l'aide du réseau de neurones. Les moyennes mensuelles sont de 0,75 et 0,95 $\mu g m^{-2} s^{-1}$ pour les flux du réseau de neurones et ceux de l'algorithme G93 respectivement.

Un autre exemple de comparaison sur une période différente est illustré par la figure 7.6, ici seuls les flux calculés sont représentés. Pour la journée du 23 août caractérisée par un faible ensoleillement, les deux méthodes présentent un bon accord en milieu de journée. On retrouve par contre un désaccord entre les deux méthodes en fin de journée avec une chute brutale des flux G93 alors que les flux modélisés à l'aide du réseau de neurones présentent une décroissance moins marquée.

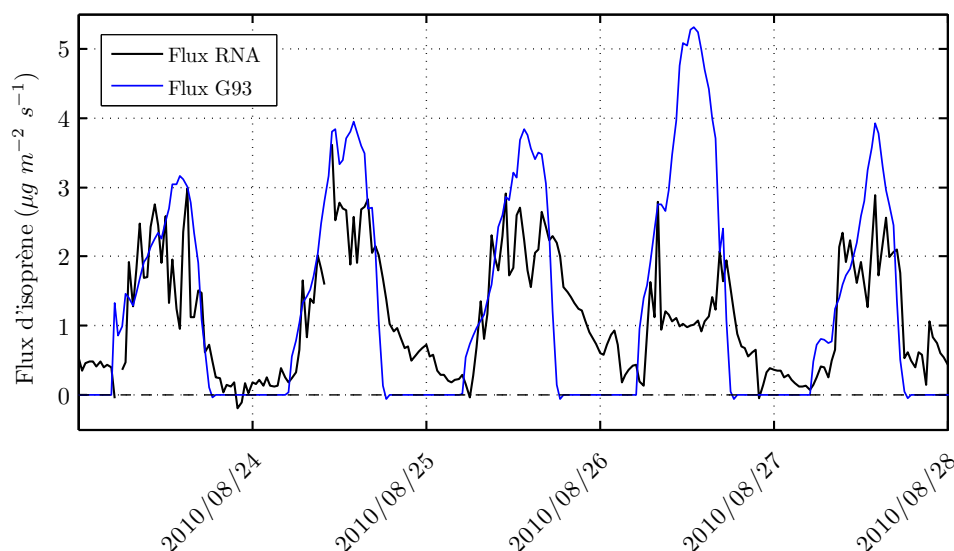


FIGURE 7.6 – Comparaison des flux d'isoprène calculés avec la relation du réseau de neurones et avec l'algorithme G93. La période du 23 août au 28 août est présentée ici.

Dans les autres cas, les flux G93 sont plus forts en milieu de journée et en particulier pour la journée du 26 août où la température atteint le maximum du mois à 32,8 °C. Ici, les flux modélisés à l'aide du réseau de neurones sont anormalement faibles étant donnée la température élevée et semblent avoir été contraints par le flux de chaleur latente qui présente une amplitude plus faible que les journées voisines. Cette observation reflète le potentiel du modèle obtenu à l'aide du réseau de neurones à tenir compte de la conductance stomatique liée à l'évaporation pour la limitation de l'émission d'isoprène (voir chapitre 3). Par contre, les données fournies au réseau de neurones pour la détermination de la meilleure relation entre le flux et les variables d'entrées ne sont pas suffisamment représentatives de la diversité des conditions environnementales que l'on peut rencontrer. Il est donc nécessaire d'étoffer le jeu de données avec des conditions plus variées pour améliorer les résultats du réseau de neurones.

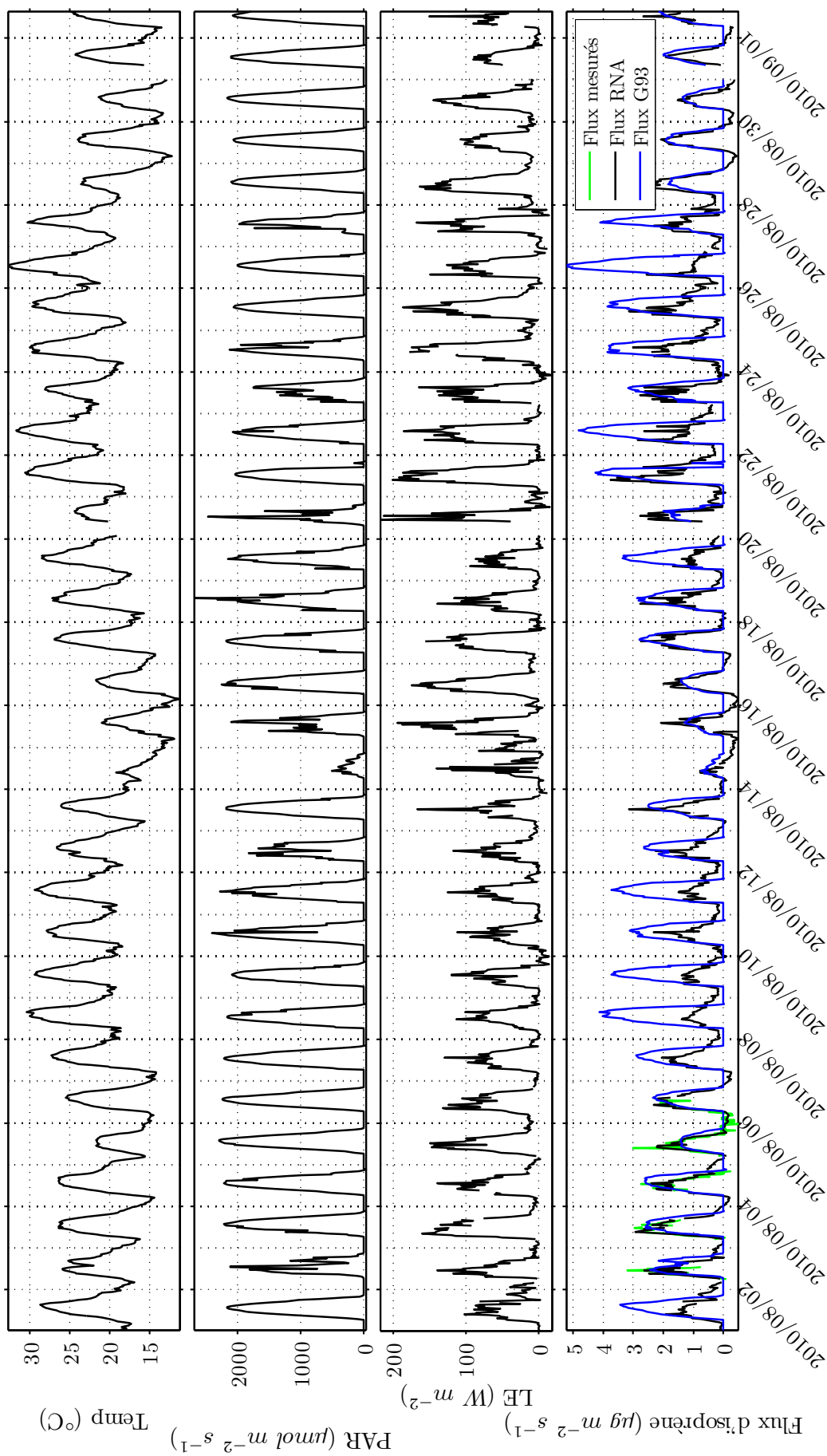


FIGURE 7.7 – Séries temporelles de température, de PAR, de flux de chaleur latente et de flux d'isoprène mesurés, calculés par le réseau de neurones, et calculés par l'algorithme G93 sur la période du 1^{er} août au 1^{er} septembre 2010.

7.3.3 Étude de sensibilité des algorithmes RNA et G93

L'influence des paramètres d'entrée sur le flux d'isoprène a été étudiée pour déterminer la sensibilité des deux algorithmes.

Algorithme G93

L'algorithme G93 utilise uniquement la température (ici la température de l'air plutôt que température des feuilles) et le rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR) pour calculer le flux d'isoprène. L'influence de ces deux paramètres est illustrée par le graphique de la figure 7.8 où l'intensité du flux d'isoprène est représentée par un gradient de couleurs en fonction de la température sur l'axe des abscisses et du PAR sur l'axe des ordonnées.

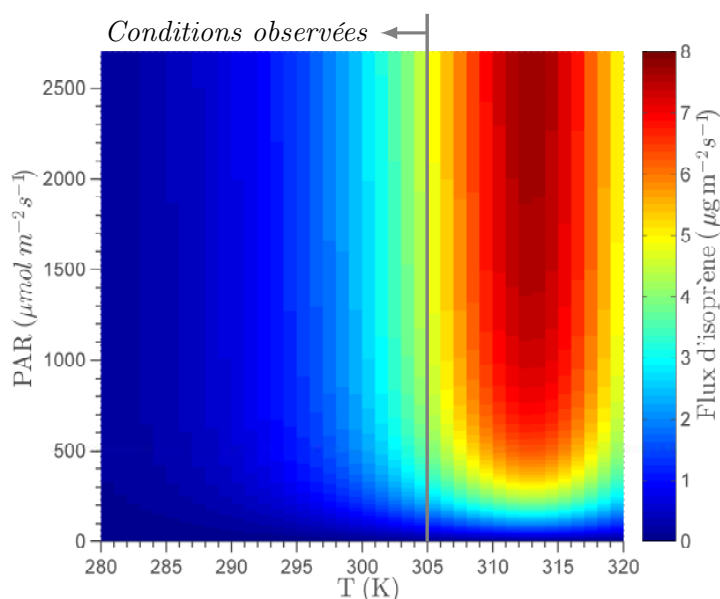


FIGURE 7.8 – Flux d'isoprène en fonction de la température et du PAR selon l'algorithme G93 développé par Guenther et al., 1993.

Cette figure montre le lien exponentiel entre la température ou le PAR et les émissions d'isoprène. Plus précisément on remarque que le PAR joue un rôle important lorsqu'il est faible; au delà de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, son influence sur les émissions d'isoprène est limitée. D'après le modèle, les émissions d'isoprène seront nulles la nuit (PAR nul) et leur intensité en journée sera principalement dépendante de la température. L'influence de la température se traduit par une augmentation des flux d'isoprène avec l'augmentation de la température. L'influence de la température sur le flux d'isoprène est importante sur la plage de température de 25 à 35 °C. Au delà de 40 °C l'effet de la température s'inverse ce qui s'explique par une baisse d'activité de la plante dans des conditions de température extrême. La valeur de température correspondant au maximum d'intensité pour les flux d'isoprène est un paramètre ajustable du modèle si la valeur utilisée ne correspond pas à la végétation étudiée.

Algorithme du RNA

L'algorithme développé à partir du réseau de neurones utilise la température, le PAR et le flux de chaleur latente pour calculer le flux d'isoprène. La figure 7.9 illustre l'influence

de la température et du PAR sur le flux d'isoprène pour une valeur de flux de chaleur latente fixée arbitrairement à 200 W m^{-2} . On observe ici que l'influence de la température est similaire à celle de l'algorithme G93 mais avec un flux d'isoprène maximum à une température d'environ 28°C plus faible que pour l'algorithme G93.

L'influence du PAR se traduit par une augmentation de l'intensité des flux d'isoprène avec une augmentation des valeurs de PAR mais on remarque que le flux n'est que peu contraint pour les faibles valeurs de PAR et en particulier lorsque les températures sont élevées. Ce comportement anormal est lié au manque d'observations dans des conditions de faible PAR pour l'apprentissage du réseau de neurones.

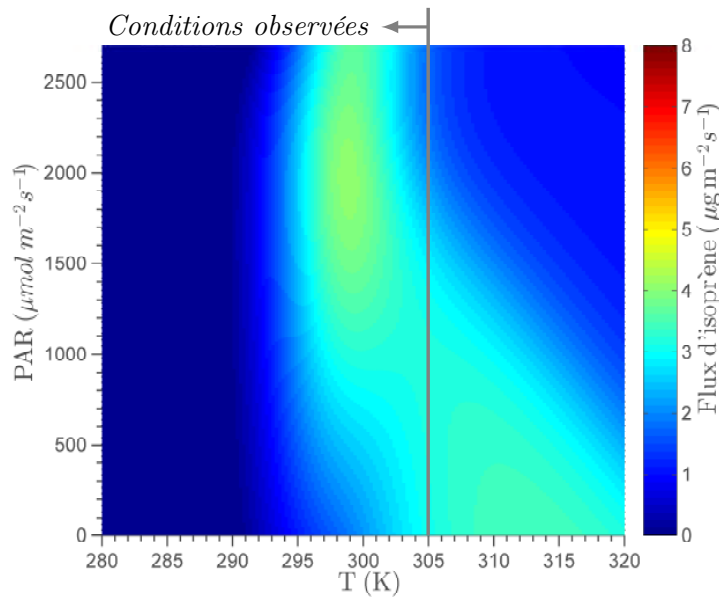


FIGURE 7.9 – Flux d'isoprène en fonction de la température et du PAR selon l'algorithme du réseau de neurones. Le flux de chaleur latente est fixé à 200 W m^{-2} .

Enfin, l'influence du flux de chaleur latente sur le flux d'isoprène dans l'algorithme du réseau de neurones est illustré par la figure 7.10. Ce graphique représente le flux d'isoprène en fonction de la température et du flux de chaleur latente avec un PAR fixé arbitrairement à $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. D'après la figure, le flux de chaleur latente influence de façon positive le flux d'isoprène et cette influence est significative pour des valeurs de flux de chaleur latente supérieures à 150 W m^{-2} .

Les conditions environnementales caractéristiques de la campagne de mesure sont résumées dans le tableau 7.3 pour les variables utilisées par le réseau de neurones. Ce sont donc ces conditions qui ont servi pour l'apprentissage du réseau de neurones et qui montrent le domaine d'applicabilité du modèle obtenu.

Paramètre	moyenne	médiane	max	min	écart type
Température (K)	294.5	294.3	305.9	284.4	4.4
PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	636.2	165.3	2694	-25.4	774
Flux LE (W m^{-2})	44.7	25.3	217.6	-17.7	47.2

TABLE 7.3 – Conditions environnementales de la campagne de mesure du 2 au 6 août 2010 pour les paramètres de température, PAR et flux de chaleur latente.

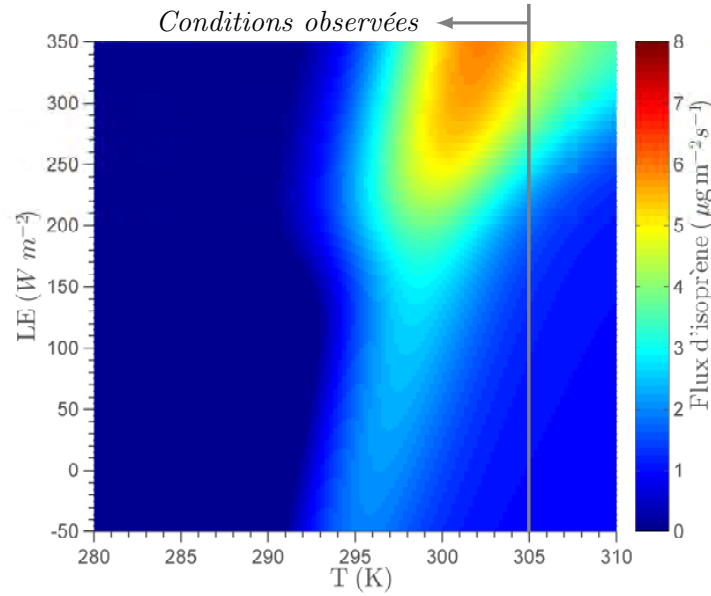


FIGURE 7.10 – Flux d'isoprène en fonction de la température et du flux de chaleur latente selon l'algorithme du réseau de neurones. Le PAR est fixé à $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Ces conditions sont à considérer lors de l'étude des figures 7.9 et 7.10 qui montrent les flux d'isoprène en fonction des paramètres environnementaux puisqu'elles définissent les limites d'apprentissage de l'algorithme du réseau de neurones.

7.4 Conclusion

Les réseaux de neurones sont des outils statistiques puissants qui permettent de modéliser des phénomènes à partir d'observations. Ici, les flux d'isoprène ont été modélisés à l'aide d'un réseau de neurones de type perceptron multi-couches. Un jeu de données issu de la campagne de mesure à l'OHP à l'été 2010 a été utilisé pour l'élaboration du modèle. Les paramètres environnementaux sélectionnés pour le réseau de neurones sont la température de l'air, le PAR et le flux de chaleur latente. Le modèle obtenu donne de bons résultats sur les données qui ont servi à sa création et à sa validation. Le modèle a été utilisé pour calculer les flux d'isoprène sur une période plus étendue du 1^{er} août au 1^{er} septembre 2010. Les résultats du réseau de neurones ont été comparés aux flux calculés par un autre modèle très utilisé (algorithme G93) sur la période du mois d'août. Les flux calculés par ces deux méthodes sont proches et présentent des variations diurnes caractéristiques. On note toutefois une sur-estimation des flux calculés par le modèle G93 par rapport aux flux calculés par le réseau de neurones. Une amélioration du modèle généré à l'aide du réseau de neurones est possible en étoffant le jeu de données sur lequel il est basé et en ajoutant des données mesurées dans des conditions environnementales variées. Ici, le modèle est performant pour des conditions climatiques restreintes caractérisées par un ensoleillement fort et des températures proches de 20 °C. Les propriétés de généralisation du modèle seront améliorées si les données qui ont servi à son élaboration regroupent la plupart des conditions susceptibles d'être rencontrées. L'utilisation d'un jeu de données plus important pourrait aussi permettre de mettre en évidence l'effet d'autres variables.

Chapitre 8

Conclusion générale et perspectives

8.1 Conclusion

Cette thèse a été consacrée au projet MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) avec comme objectifs de développer et réaliser un instrument pour la mise en œuvre de la méthode DEC et de déployer cet instrument pour mesurer les émissions de COV biogéniques en région méditerranéenne. Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme *ChArMEx* dont la campagne de mesures intensives aura lieu à l'été 2013.

Les COV biogéniques jouent un rôle important en tant que précurseurs de pollution atmosphérique (ozone, AOS, ...). La quantification des émissions naturelles de COV présente de grandes incertitudes et nécessite des mesures in situ à des échelles représentatives de l'écosystème pour améliorer les cadastres d'émissions sur lesquels reposent les études de modélisation de la chimie de l'atmosphère. Les mesures de flux par micrométéorologie sont intégrées à l'échelle de la forêt et permettent des études in situ sans perturber la source d'émission.

La méthode EC constitue une référence pour les mesures micrométéorologiques. Cependant elle est limitée à la mesure d'espèces pour lesquelles il existe des analyseurs rapides (temps de réponse $\sim 0,1$ s). Les analyseurs de COV ne sont pas encore assez rapides et sensibles pour cette méthode mais sont tout à fait compatibles avec la méthode DEC qui représente une alternative à la méthode EC en autorisant un temps d'analyse plus long (quelques secondes). La mise en œuvre de la méthode DEC requiert un dispositif de prélèvement spécifique. En effet, il doit être capable de capturer des échantillons en un intervalle de temps très court ($\leq 0,2$ s) et assurer son transfert vers un analyseur dans des conditions optimales pour l'analyse. De plus il doit être capable d'alimenter en continu l'analyseur avec un débit et une pression constants.

Le système développé pendant ce travail de thèse répond aux exigences de la technique DEC. Il est constitué d'un système de prélèvement, d'un boîtier de contrôle/commande, et d'une centrale d'acquisition des données. Le système de prélèvement comprend deux seringues mécaniques dont le volume est contrôlé par un piston et un vérin électrique. Le cycle de prélèvement est découpé en trois phases : une phase de vidange et mise sous vide du réservoir, une phase de capture et une phase de transfert de l'échantillon vers l'analyseur (ou phase d'analyse). Trois électrovannes orientent le débit d'air depuis l'extérieur vers le réservoir pendant la capture, depuis le réservoir vers la pompe à vide pendant la mise sous vide et du réservoir vers l'analyseur pendant l'analyse. Une mesure de pression

dans les réservoirs permet de réguler la variation de volume du réservoir via le vérin pendant le transfert de l'échantillon vers l'analyseur. Ce transfert à pression constante assure une perturbation minimale de l'analyseur. Un vide inférieur à 40 hPa dans le réservoir permet une capture rapide des échantillons. Les COV étant des molécules réactives, les matériaux utilisés pour le système de prélèvement ont été spécifiquement choisis pour ne pas contaminer ou détruire l'échantillon (inox 316L et téflon). De nombreux aspects techniques de ce développement instrumental sont innovants et apportent de nouvelles perspectives à la mise en œuvre de la technique DEC.

L'instrument MEDEE a été conçu pour fonctionner au sol et sur un avion dédié à la recherche scientifique. Les mesures de flux aéroportées sont représentatives d'une zone étendue, à l'échelle des mailles des cadastres d'émissions.

L'instrument MEDEE a été validé au sol et en avion lors de deux campagnes de mesure. Au sol, les flux de chaleur latente et de CO₂ mesurés par DEC avec MEDEE ont été comparés avec les flux mesurés par EC. Les résultats ont montré une forte corrélation entre les deux méthodes et une légère sous-estimation des flux DEC de 14%. En avion, les flux de chaleur latente ont été mesurés par DEC avec MEDEE et par EC. La comparaison des flux a aussi montré une forte corrélation entre les deux méthodes et une légère sur-estimation des flux DEC. Ces résultats satisfaisants ont permis de valider l'instrument MEDEE. D'autres campagnes de mesure pourront permettre d'améliorer la caractérisation de l'instrument notamment par l'identification de l'origine des différents biais observés.

Plusieurs campagnes de mesures de flux de COV ont été menées pendant les étés 2010 et 2011 avec l'instrument MEDEE couplé à un analyseur d'isoprène. Les flux d'isoprène ont été mesurés par DEC au-dessus d'une forêt de chênes pubescents. Le taux d'émission standard calculé à partir des mesures a été comparé avec les valeurs présentes dans la littérature pour ce type de végétation et est comparable à la plus faible valeur reportée.

Pendant ces campagnes, les mesures de flux d'isoprène ont été accompagnées de mesures de nombreux paramètres météorologiques, mais aussi de paramètres tels que les flux de chaleur sensible, de chaleur latente, de CO₂ et les concentrations d'ozone.

Ces mesures effectuées pour caractériser l'atmosphère ont permis de proposer une nouvelle paramétrisation des flux d'isoprène. Auparavant, seuls la température et le PAR étaient pris en compte pour le calcul des flux d'isoprène. Ici, une approche statistique a été utilisée pour établir une nouvelle relation entre les flux d'isoprène et plusieurs variables. Ces variables ont été testées parmi l'ensemble des paramètres mesurés pendant la campagne dans le but d'améliorer la modélisation des flux d'isoprène. Ce travail réalisé à l'aide d'un réseau de neurones artificiels a permis de créer une nouvelle paramétrisation avec comme variables d'entrée la température, le PAR et le flux de chaleur latente. Cette paramétrisation a été testée sur la période du mois d'août 2010 et comparée avec le modèle de référence G93. Les résultats sont en accord avec les flux mesurés sur le site et montrent une sur-estimation des flux d'isoprène modélisés par l'algorithme G93. D'autres mesures sont nécessaires pour étendre cette paramétrisation des flux d'isoprène par RNA à d'autres périodes de l'année.

8.2 Perspectives

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives d'un point de vue expérimental mais aussi du point de vue de la paramétrisation des émissions. Le système développé pour la mesure de flux par la méthode DEC offre la possibilité d'effectuer des mesures de flux de COV

au sol à l'échelle de la canopée et aussi en avion à des échelles de plusieurs kilomètres. Le couplage avec le PTR-MS pour la mesure d'un plus grand nombre d'espèces de COV a été testé au sol mais n'a pu être validé à cause d'un problème de sensibilité de l'instrument. En avion, le couplage a été testé mais les résultats n'ont pas encore été analysés. D'autre part, les caractéristiques de MEDEE le rendent compatible avec la mesure d'autres composés en trace réactifs ou non réactifs et l'utilisation d'autres analyseurs. De nouveaux analyseurs ont vu le jour suite aux progrès récents en spectroscopie laser (lasers à cascade quantique, spectroscopie laser avec cavités résonantes). Ces analyseurs présentent des sensibilités et des limites de détections compatibles avec la mesure d'espèces en trace (CO , CH_4 , N_2O , NO_x , ...), leurs temps de réponses sont adaptés à la mesure de flux grâce à la méthode DEC.

Dans un futur proche, MEDEE sera utilisé lors d'une campagne *ChArMEx* à l'été 2014 pour la mesure de flux de COV sur le site de l'Observatoire de Haute Provence. En complément des mesures de flux, la réactivité de l'atmosphère sera mesurée grâce à une collaboration avec le NCAR (National Center For Atmospheric Research, USA) et des mesures de turbulence et de concentrations de COV et d'ozone en avion seront menées simultanément. Ces résultats pourront ensuite servir pour l'étude de la chimie de l'atmosphère dans un modèle de boîte 0D ou dans un modèle couplé dynamique-chimie.

Sur long terme, des projets d'étude de la chimie de l'atmosphère en Afrique et en Guyane française sont en préparation avec un besoin de caractérisation des émissions de COV impliquant des mesures de flux. De plus, la méthode DEC constitue un atout pour la mesure de flux d'espèces azotées pour l'étude des bilans d'azote.

La modélisation des flux d'isoprène à l'aide d'un réseau de neurones est une approche peu utilisée mais dont les résultats sont prometteurs à condition de posséder une base de données d'apprentissage représentative pour pouvoir généraliser le modèle sur des cas plus variés. Cette nouvelle paramétrisation pourra évoluer grâce aux campagnes de mesure prévues dans le cadre de *ChArMEx*, qui permettront de collecter des données dans des cas météorologiques plus variés. De plus, il sera intéressant par la suite de tester cette paramétrisation dans un modèle 3D couplé physico-chimie, afin d'évaluer l'impact des émissions d'isoprène sur la chimie de la troposphère, notamment sur les concentrations d'ozone. Je débiterai ce travail de modélisation à l'issue de cette thèse, pour des cas d'étude de la campagne TRAQA, afin de compléter l'approche mesures/modèle amorcée dans le travail présenté dans ce manuscrit. A plus longue échéance, il sera intéressant de comparer les résultats de ce travail avec un modèle d'émission global tel que MEGAN développé par *Guenther et al.* (2006).

Bibliographie

- Ammann, C., A. Brunner, C. Spirig, and A. Neftel (2006), Technical note : Water vapour concentration and flux measurements with PTR-MS, *Atmos. Chem. Phys.*, *6*(12), 4643–4651, doi :10.5194/acp-6-4643-2006.
- Anderson, S. E., J. R. Wells, A. Fedorowicz, L. F. Butterworth, B. J. Meade, and A. E. Munson (2007), Evaluation of the contact and respiratory sensitization potential of volatile organic compounds generated by simulated indoor air chemistry, *Toxicological sciences : an official journal of the Society of Toxicology*, *97*(2), 355–363, doi :10.1093/toxsci/kfm043.
- Atkinson, R. (2000), Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x, *Atmospheric Environment*, *34*(12–14), 2063–2101, doi :10.1016/S1352-2310(99)00460-4.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, U. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. Kowalski, P. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini, T. Vesala, A. Fitter, and D. Raffaelli (2000), Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests : The EUROFLUX methodology, in *Advances in Ecological Research*, vol. 30, pp. 113–175, Academic Press.
- Aumont, B., and G. Toupance (1994), Modélisation de la chimie de la basse troposphère continentale développement et tests d’un modèle chimique condensé, Ph.D. thesis, Université de Paris 07.
- Aumont, B., S. Szopa, and S. Madronich (2005), Modelling the evolution of organic carbon during its gas-phase tropospheric oxidation : development of an explicit model based on a self generating approach, *Atmos. Chem. Phys.*, *5*(9), 2497–2517, doi :10.5194/acp-5-2497-2005.
- Axford, D. N. (1968), On the accuracy of wind measurements using an inertial platform in an aircraft, and an example of a measurement of the vertical mesostructure of the atmosphere, *Journal of Applied Meteorology*, *7*(4), 645–666, doi :10.1175/1520-0450(1968)007<0645:OTAOWM>2.0.CO;2.
- Baghi, R., D. Helmig, A. Guenther, T. Duhl, and R. Daly (2012a), Contribution of flowering trees to urban atmospheric biogenic volatile organic compound emissions, *Biogeosciences*, *9*(10), 3777–3785, doi :10.5194/bg-9-3777-2012.
- Baghi, R., P. Durand, C. Jambert, C. Jarnot, C. Delon, D. Serça, N. Striebig, M. Ferlicq, and P. Keravec (2012b), A new disjunct eddy-covariance system for BVOC flux mea-

- surements - validation on CO₂ and H₂O fluxes, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(12), 3119–3132, doi :10.5194/amt-5-3119-2012.
- Bell, C. M., and A. S. Harestad (1987), Efficacy of pine oil as repellent to wildlife, *Journal of Chemical Ecology*, 13(6), 1409–1417, doi :10.1007/BF01012287.
- Bergamo, A., A. M. Tafuro, S. Kinne, F. De Tomasi, and M. R. Perrone (2008), Monthly-averaged anthropogenic aerosol direct radiative forcing over the mediterranean based on AERONET aerosol properties, *Atmos. Chem. Phys.*, 8(23), 6995–7014, doi :10.5194/acp-8-6995-2008.
- Bertin, N., M. Staudt, U. Hansen, G. Seufert, P. Ciccioli, P. Foster, J. Fugit, and L. Torres (1997), Diurnal and seasonal course of monoterpene emissions from quercus ilex (L.) under natural conditions application of light and temperature algorithms, *Atmospheric Environment*, 31, Supplement 1(0), 135–144, doi :10.1016/S1352-2310(97)00080-0.
- Béziat, P., E. Ceschia, and G. Dedieu (2009), Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in south west france, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), 1628–1645, doi :10.1016/j.agrformet.2009.05.004.
- Blake, R. S., P. S. Monks, and A. M. Ellis (2011), Proton-transfer reaction mass spectrometry, *Chem. Rev.*, 109(3), 861–896, doi :doi:10.1021/cr800364q.
- Bosveld, F., and A. Beljaars (2001), The impact of sampling rate on eddy-covariance flux estimates, *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1), 39–45, doi :10.1016/S0168-1923(01)00257-X.
- Brown, E. N., C. A. Friehe, and D. H. Lenschow (1983), The use of pressure fluctuations on the nose of an aircraft for measuring air motion, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(1), 171–180, doi :10.1175/1520-0450(1983)022<0171:TUOPFO>2.0.CO;2.
- Businger, J. A. (1982), Equations and concepts, in *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling*, pp. 1–36, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, F. T. M. Nieuwstadt and H. van Dop.
- Businger, J. A., and S. P. Oncley (1990), Flux measurement with conditional sampling, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(2), 349–352, doi :10.1175/1520-0426(1990)007<0349:FMWCS>2.0.CO;2.
- Carde, J., C. Bernard-Dagan, and M. Gleizes (1980), Membrane systems involved in synthesis and transport of monoterpene hydrocarbons in pine leaves, *Biogenesis and function of plant lipids*, Mazliak, P., Benveniste, P., Costes, C., Douce, R., eds. Elsevier/North-Holland Biomedical Press. Amsterdam, p. 441–444.
- Cheniclet, C. (1987), Effects of wounding and fungus inoculation on terpene producing systems of maritime pine, *Journal of Experimental Botany*, 38(9), 1557–1572, doi : 10.1093/jxb/38.9.1557.
- Ciccioli, P., E. Brancaleoni, M. Frattoni, V. Di Palo, R. Valentini, G. Tirone, G. Seufert, N. Bertin, U. Hansen, O. Csiky, R. Lenz, and M. Sharma (1999), Emission of reactive

- terpene compounds from orange orchards and their removal by within-canopy processes, *J. Geophys. Res.*, 104(D7), 8077–8094.
- CITEPA (2007), *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Séries sectorielles et analyses étendues*, 291 pp., Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique CITEPA / CORALIE / format SECTEN – mise à jour février 2007.
- Cros, B., P. Durand, H. Cachier, P. Drobinski, E. Fréjafon, C. Kottmeier, P. Perros, V.-H. Peuch, J.-L. Ponche, D. Robin, F. Saïd, G. Toupance, and H. Wortham (2004), The ESCOMPTE program : an overview, *Atmospheric Research*, 69(3–4), 241–279, doi :10.1016/j.atmosres.2003.05.001.
- Croteau, R. (1977), Effect of irrigation method on essential oil yield and rate of oil evaporation in mint grown under controlled conditions, *HortScience*, 12, 563–565.
- Croteau, R., and J. Gershenzon (1994), Genetic control of monoterpene biosynthesis in mints (*Mentha* :Lamiaceae), *In Genetic Engineering of Plant Secondary Metabolism, Recent Advances in Phytochemistry, Vol. 28, B.E. Ellis, G.W. Kuroki, and H.A. Stafford, eds (New York : Plenum)*, 28, 193–229.
- Dabberdt, W. F., D. H. Lenschow, T. W. Horst, P. R. Zimmerman, S. P. Oncley, and A. C. Delany (1993), Atmosphere-surface exchange measurements, *Science*, 260(5113), 1472–1481.
- De Moor, G. (1996), *Les théories de la turbulence dans la couche-limite atmosphérique*, 312 pp., Ministère des transports direction de la météorologie, Météo France.
- Delon, C., D. Serça, C. Boissard, R. Dupont, A. Dutot, P. Laville, P. De Rosnay, and R. Delmas (2007), Soil NO emissions modelling using artificial neural network, *Tellus B*, 59(3), 502–513, doi :10.1111/j.1600-0889.2007.00254.x.
- Dement, W. A., B. J. Tyson, and H. A. Mooney (1975), Mechanism of monoterpene volatilization in *salvia mellifera*, *Phytochemistry*, 14(12), 2555–2557, doi :10.1016/0031-9422(75)85223-X.
- Desjardins, R. L. (1977), Description and evaluation of a sensible heat flux detector, *Boundary-Layer Meteorology*, 11(2), 147–154, doi :10.1007/BF02166801.
- Dobson, H. (1994), Floral volatiles in insect biology, *Insect-Plant Interactions, E. Bernays, ed (Boca Raton, FL : CRC Press)*, 5, 47–81.
- Dolman, A. J., J. Noilhan, P. Durand, C. Sarrat, A. Brut, B. Piguet, A. Butet, N. Jarosz, Y. Brunet, D. Loustau, E. Lamaud, L. Tolk, R. Ronda, F. Miglietta, B. Gioli, V. Magliulo, M. Esposito, C. Gerbig, S. Körner, P. Glademard, M. Ramonet, P. Ciais, B. Neininger, R. W. A. Hutjes, J. A. Elbers, R. Macatangay, O. Schrems, G. Pérez-Landa, M. J. Sanz, Y. Scholz, G. Facon, E. Ceschia, and P. Beziat (2006), The CarboEurope regional experiment strategy, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(10), 1367–1379, doi :10.1175/BAMS-87-10-1367.
- Duhl, T. R., D. Helmig, and A. B. Guenther (2008), Sesquiterpene emissions from vegetation : a review, *Biogeosciences*, 5(3), 761–777.

- Durand, P., H. Dupuis, D. Lambert, B. Bénech, A. Druilhet, K. Katsaros, P. K. Taylor, and A. Weill (1998), Comparison of sea surface flux measured by instrumented aircraft and ship during SOFIA and SEMAPHORE experiments, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 103(C11), 25,125–25,136, doi :10.1029/97JC03758.
- Dyer, A. J. (1974), A review of flux-profile relationships, *Boundary-Layer Meteorology*, 7(3), 363–372, doi :10.1007/BF00240838.
- Elliott, S., and A. Loudon (1987), Effects of monoterpene odors on food selection by red deer calves (*Cervus elaphus*), *Journal of chemical ecology*, 13(6), 1343–1349.
- Fang, C., R. K. Monson, and E. B. Cowling (1996), Isoprene emission, photosynthesis, and growth in sweetgum (*Liquidambar styraciflua*) seedlings exposed to short- and long-term drying cycles, *Tree physiology*, 16(4), 441–446.
- Farentinos, R. C., P. J. Capretta, R. E. Kepner, and V. M. Littlefield (1981), Selective herbivory in tassel-eared squirrels : role of monoterpenes in ponderosa pines chosen as feeding trees, *Science (New York, N.Y.)*, 213(4513), 1273–1275, doi :10.1126/science.213.4513.1273.
- Fares, S., C. Barta, F. Brilli, M. Centritto, L. Ederli, F. Ferranti, S. Pasqualini, L. Reale, D. Tricoli, and F. Loreto (2006), Impact of high ozone on isoprene emission, photosynthesis and histology of developing populus alba leaves directly or indirectly exposed to the pollutant, *Physiologia Plantarum*, 128(3), 456–465, doi :10.1111/j.1399-3054.2006.00750.x.
- Fischer, N. H. (1991), Plant terpenoids as allelopathic agents, *J. B. Harborne, and F. A. Tomas-Barberan (eds), Ecological Chemistry and Biochemistry of Plant Terpenoids*, Clarendon Press, Oxford, p. 377–398.
- Foken, T., and B. Wichura (1996), Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1-2), 83–105, doi :10.1016/0168-1923(95)02248-1.
- Fuentes, J. D., L. Gu, M. Lerdau, R. Atkinson, D. Baldocchi, J. W. Bottenheim, P. Ciccioli, B. Lamb, C. Geron, A. Guenther, T. D. Sharkey, and W. Stockwell (2000), Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer : A review, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(7), 1537–1575, doi :10.1175/1520-0477(2000)081<1537:BHITAB>2.3.CO;2.
- Funk, C., E. Lewinsohn, B. S. Vogel, C. L. Steele, and R. Croteau (1994), Regulation of oleoresinosis in grand fir (*Abies grandis*) (Coordinate induction of monoterpene and diterpene cyclases and two cytochrome p450-dependent diterpenoid hydroxylases by stem wounding), *Plant Physiology*, 106(3), 999–1005.
- Geron, C. D., D. Nie, R. R. Arnts, T. D. Sharkey, E. L. Singsaas, P. J. Vanderveer, A. Guenther, J. E. S. Ii, and T. E. Kleindienst (1997), Biogenic isoprene emission : Model evaluation in a southeastern united states bottomland deciduous forest, *Journal of Geophysical Research*, 102(D15), 18,889–18,901, doi :10.1029/97JD00968.

- Gershenzon, J., and R. Croteau (1991), Terpenoids, *G. Rosenthal and M. Berenbaum (eds), Herbivores : Their Interactions with Secondary Plant Metabolites, Vol. I : The Chemical Participants, Academic Press*, p. 165–219.
- Gleizes, M., G. Pauly, J.-P. Carde, A. Marpeau, and C. Bernard-Dagan (1983), Monoterpene hydrocarbon biosynthesis by isolated leucoplasts of *Citrofortunella mitis*, *Planta*, *159*(4), 373–381, doi :10.1007/BF00393177.
- Guenther, A. (1997), Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compound emissions, *Ecological Applications*, *7*(1), 34–45, doi :10.1890/1051-0761(1997)007[0034:SASVIN]2.0.CO;2.
- Guenther, A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W. A. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. Zimmerman (1995), A global model of natural volatile organic compound emissions, *Journal of Geophysical Research*, *100*(D5), PP. 8873–8892, doi : 199510.1029/94JD02950.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron (2006), Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of emissions of gases and aerosols from nature), *Atmos. Chem. Phys.*, *6*(11), 3181–3210, doi :10.5194/acp-6-3181-2006.
- Guenther, A. B., and A. J. Hills (1998), Eddy covariance measurement of isoprene fluxes, *Journal of Geophysical Research*, *103*(D11), PP. 13,145–13,152, doi :199810.1029/97JD03283.
- Guenther, A. B., R. K. Monson, and R. Fall (1991), Isoprene and monoterpene emission rate variability : Observations with eucalyptus and emission rate algorithm development, *Journal of Geophysical Research*, *96*(D6), 10,799–10,808, doi :10.1029/91JD00960.
- Guenther, A. B., P. R. Zimmerman, P. C. Harley, R. K. Monson, and R. Fall (1993), Isoprene and monoterpene emission rate variability : Model evaluations and sensitivity analyses, *Journal of Geophysical Research*, *98*(D7), PP. 12,609–12,617, doi :199310.1029/93JD00527.
- Hakola, H., J. Rinne, and T. Laurila (1998), The hydrocarbon emission rates of tea-leaved willow (*Salix phylicifolia*), silver birch (*Betula pendula*) and european aspen (*Populus tremula*), *Atmospheric Environment*, *32*(10), 1825–1833, doi :10.1016/S1352-2310(97)00482-2.
- Hallquist, M., J. C. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N. M. Donahue, C. George, A. H. Goldstein, J. F. Hamilton, H. Herrmann, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jang, M. E. Jenkin, J. L. Jimenez, A. Kiendler-Scharr, W. Maenhaut, G. McFiggans, T. F. Mentel, A. Monod, A. S. H. Prévôt, J. H. Seinfeld, J. D. Surratt, R. Szmigielski, and J. Wildt (2009), The formation, properties and impact of secondary organic aerosol : current and emerging issues, *Atmos. Chem. Phys.*, *9*(14), 5155–5236, doi :10.5194/acp-9-5155-2009.

- Harley, P., A. Guenther, and P. Zimmerman (1996), Effects of light, temperature and canopy position on net photosynthesis and isoprene emission from sweetgum (*Liquidambar styraciflua*) leaves, *Tree Physiology*, *16*(1-2), 25–32, doi :10.1093/treephys/16.1-2.25.
- Harley, P., A. Guenther, and P. Zimmerman (1997), Environmental controls over isoprene emission in deciduous oak canopies, *Tree physiology*, *17*(11), 705–714.
- Heald, C. L., D. J. Jacob, S. Turquety, R. C. Hudman, R. J. Weber, A. P. Sullivan, R. E. Peltier, E. L. Atlas, J. A. d. Gouw, C. Warneke, J. S. Holloway, J. A. Neuman, F. M. Flocke, and J. H. Seinfeld (2006), Concentrations and sources of organic carbon aerosols in the free troposphere over north america, *Journal of Geophysical Research*, *111*(D23), D23S47, doi :10.1029/2006JD007705.
- Hewitt, C., B. Langford, M. Possell, T. Karl, and S. Owen (2011), Quantification of VOC emission rates from the biosphere, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *30*(7), 937–944, doi :10.1016/j.trac.2011.03.008.
- Hills, A. J., and P. R. Zimmerman (1990), Isoprene measurement by ozone-induced chemiluminescence, *Analytical Chemistry*, *62*(10), 1055–1060, doi :10.1021/ac00209a017.
- Himejima, M., K. R. Hobson, T. Otsuka, D. L. Wood, and I. Kubo (1992), Antimicrobial terpenes from oleoresin of ponderosa pine tree *Pinus ponderosa* : A defense mechanism against microbial invasion, *Journal of Chemical Ecology*, *18*(10), 1809–1818, doi :10.1007/BF02751105.
- Hornik, K., M. Stinchcombe, and H. White (1989), Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, *2*(5), 359–366, doi :10.1016/0893-6080(89)90020-8.
- Hornik, K., M. Stinchcombe, H. White, and P. Auer (1994), Degree of approximation results for feedforward networks approximating unknown mappings and their derivatives, *Neural Computation*, *6*(6), 1262–1275, doi :10.1162/neco.1994.6.6.1262.
- Isidorov, V., V. Vinogorova, and K. Rafalowski (2003), HS-SPME analysis of volatile organic compounds of coniferous needle litter, *Atmospheric Environment*, *37*(33), 4645–4650, doi :10.1016/j.atmosenv.2003.07.005.
- Janson, R. W. (1993), Monoterpene emissions from scots pine and norwegian spruce, *Journal of Geophysical Research*, *98*(D2), 2839–2850, doi :10.1029/92JD02394.
- Juuti, S., J. Arey, and R. Atkinson (1990), Monoterpene emission rate measurements from a monterey pine, *Journal of Geophysical Research*, *95*(D6), PP. 7515–7519, doi : 199010.1029/JD095iD06p07515.
- Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan (1994), *Atmospheric boundary layer flows : their structure and measurement*, 304 pp., Oxford University Press.
- Kanakidou, M., J. H. Seinfeld, S. N. Pandis, I. Barnes, F. J. Dentener, M. C. Facchini, R. Van Dingenen, B. Ervens, A. Nenes, C. J. Nielsen, E. Swietlicki, J. P. Putaud, Y. Balkanski, S. Fuzzi, J. Horth, G. K. Moortgat, R. Winterhalter, C. E. L. Myhre, K. Tsigaridis, E. Vignati, E. G. Stephanou, and J. Wilson (2005), Organic aerosol

- and global climate modelling : a review, *Atmos. Chem. Phys.*, 5(4), 1053–1123, doi : 10.5194/acp-5-1053-2005.
- Keenan, T., U. Niinemets, S. Sabate, C. Gracia, and J. Penuelas (2009), Process based inventory of isoprenoid emissions from european forests : model comparisons, current knowledge and uncertainties, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9(2), 6147–6206.
- Kesselmeier, J., L. Schäfer, P. Ciccioli, E. Brancaleoni, A. Cecinato, M. Frattoni, P. Foster, V. Jacob, J. Denis, J. Fugit, L. Dutaur, and L. Torres (1996), Emission of monoterpenes and isoprene from a mediterranean oak species quercus ilex l. measured within the BEMA (Biogenic emissions in the mediterranean area) project, *Atmospheric Environment*, 30(10–11), 1841–1850, doi :10.1016/1352-2310(95)00376-2.
- Kesselmeier, J., K. Bode, L. Schäfer, G. Schebeske, A. Wolf, E. Brancaleoni, A. Cecinato, P. Ciccioli, M. Frattoni, L. Dutaur, J. Fugit, V. Simon, and L. Torres (1998), Simultaneous field measurements of terpene and isoprene emissions from two dominant mediterranean oak species in relation to a north american species, *Atmospheric Environment*, 32(11), 1947–1953, doi :10.1016/S1352-2310(97)00500-1.
- Kettle, A. J., and M. O. Andreae (2000), Flux of dimethylsulfide from the oceans : A comparison of updated data sets and flux models, *Journal of Geophysical Research*, 105(D22), 26,793–26,808, doi :10.1029/2000JD900252.
- Kleinig, H. (1989), The role of plastids in isoprenoid biosynthesis, *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40(1), 39–59, doi :10.1146/annurev.pp.40.060189.000351.
- Kljun, N., P. Calanca, M. W. Rotach, and H. P. Schmid (2004), A simple parameterisation for flux footprint predictions, *Boundary-Layer Meteorology*, 112(3), 503–523, doi :10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96.
- Kristensen, L., D. H. Lenschow, D. Gurarie, and N. O. Jensen (2009), A simple model for the vertical transport of reactive species in the convective atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 134(2), 195–221, doi :10.1007/s10546-009-9443-x.
- Kroll, J. H., and J. H. Seinfeld (2008), Chemistry of secondary organic aerosol : Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 42(16), 3593–3624, doi :10.1016/j.atmosenv.2008.01.003.
- Kullback, S., and R. A. Leibler (1951), On information and sufficiency, *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(1), 79–86.
- Kuzma, J., and R. Fall (1993), Leaf isoprene emission rate is dependent on leaf development and the level of isoprene synthase, *Plant Physiology*, 101(2), 435–440, doi : 10.2307/4274985.
- Lagorse, V. (2009), *Conception et développement de la carte sequence, Rapport de stage de TSI (École Nationale de la Météorologie)*, 61 pp., Laboratoire d’Aérodynamique.

- Lambert, D., and P. Durand (1998), Aircraft to aircraft intercomparison during SEMAPHORE, *Journal of Geophysical Research*, 103(C11), PP. 25,109–25,123, doi : 199810.1029/97JC02199.
- Langford, B., B. Davison, E. Nemitz, and C. N. Hewitt (2009), Mixing ratios and eddy covariance flux measurements of volatile organic compounds from an urban canopy (manchester, UK), *Atmos. Chem. Phys.*, 9(6), 1971–1987, doi :10.5194/acp-9-1971-2009.
- Laurila, T., H. Hakola, and V. Lindfors (1999), Biogenic VOCs in continental northern Europe—Concentrations and photochemistry, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(6), 689–693, doi :10.1016/S1464-1909(99)00066-0.
- Lee, X. (1998), On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(12), 39–49, doi :10.1016/S0168-1923(98)00071-9.
- Lemarchand, K. (2003), *Mise en place d'une campagne d'inter comparaison des flux pour valider la méthode "Disjunct Eddy Correlation" et étude de la faisabilité de mesures de flux d'aérosols - Rapport de stage de DESS MISSAO*, 55 pp., Météo France, 4M, Toulouse.
- Lenschow, D. (1986), Aircraft measurements in the boundary layer, *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, Lenschow DH. (ed.) Amer. Meteorol. Soc : Boston, USA., pp. 39–56.
- Lenschow, D. H., and M. R. Raupach (1991), The attenuation of fluctuations in scalar concentrations through sampling tubes, *Journal of Geophysical Research*, 96(D8), 15,259–15,268, doi :10.1029/91JD01437.
- Lenschow, D. H., J. Mann, and L. Kristensen (1994), How long is long enough when measuring fluxes and other turbulence statistics?, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(3), 661–673, doi :10.1175/1520-0426(1994)011<0661:HLILEW>2.0.CO;2.
- Lerdau, M., and M. Keller (1997), Controls on isoprene emission from trees in a subtropical dry forest, *Plant, Cell & Environment*, 20(5), 569–578, doi :10.1111/j.1365-3040.1997.00075.x.
- Lerdau, M., A. Guenther, and R. Monson (1997), Plant production and emission of volatile organic compounds, *BioScience*, 47(6), 373–383, doi :10.2307/1313152.
- Leuning, R., and K. M. King (1992), Comparison of eddy-covariance measurements of CO₂ fluxes by open- and closed-path CO₂ analysers, *Boundary-Layer Meteorology*, 59(3), 297–311, doi :10.1007/BF00119818.
- Lewinsohn, E., M. Gijzen, and R. Croteau (1991), Defense mechanisms of conifers : differences in constitutive and wound-induced monoterpene biosynthesis among species, *Plant physiology*, 96(1), 44–49.
- Litvak, M. E., F. Loreto, P. C. Harley, T. D. Sharkey, and R. K. Monson (1996), The response of isoprene emission rate and photosynthetic rate to photon flux and nitrogen

- supply in aspen and white oak trees, *Plant, Cell & Environment*, 19(5), 549–559, doi : 10.1111/j.1365-3040.1996.tb00388.x.
- Liu, S. C., M. Trainer, M. A. Carroll, G. Hübler, D. D. Montzka, R. B. Norton, B. A. Ridley, J. G. Walega, E. L. Atlas, B. G. Heikes, B. J. Huebert, and W. Warren (1992), A study of the photochemistry and ozone budget during the mauna loa observatory photochemistry experiment, *Journal of Geophysical Research*, 97(D10), 10,463–10,471, doi :10.1029/91JD02298.
- Lohou, F., F. Saïd, M. Lothon, P. Durand, and D. Serça (2010), Impact of boundary-layer processes on near-surface turbulence within the west african monsoon, *Boundary-Layer Meteorology*, 136(1), 1–23, doi :10.1007/s10546-010-9493-0.
- Loreto, F., and T. D. Sharkey (1993), Isoprene emission by plants is affected by transmissible wound signals, *Plant, Cell & Environment*, 16(5), 563–570, doi :10.1111/j.1365-3040.1993.tb00904.x.
- Loreto, F., P. Ciccioli, A. Cecinato, E. Brancaleoni, M. Frattoni, C. Fabozzi, and D. Tricoli (1996a), Evidence of the photosynthetic origin of monoterpenes emitted by quercus ilex l. leaves by ^{13}C labeling., *Plant Physiology*, 110(4), 1317–1322.
- Loreto, F., P. Ciccioli, A. Cecinato, E. Brancaleoni, M. Frattoni, and D. Tricoli (1996b), Influence of environmental factors and air composition on the emission of [alpha]-pinene from quercus ilex leaves, *Plant Physiology*, 110(1), 267–275, doi :10.1104/pp.110.1.267.
- Mallet, M., V. Pont, C. Lioussé, J. Roger, and P. Dubuisson (2006), Simulation of aerosol radiative properties with the ORISAM-RAD model during a pollution event (ESCOMPTE 2001), *Atmospheric Environment*, 40(40), 7696–7705, doi :10.1016/j.atmosenv.2006.08.031.
- Marenco, A., H. Gouget, P. Nédélec, J.-P. Pagès, and F. Karcher (1994), Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from pic du midi data series : Consequences : Positive radiative forcing, *Journal of Geophysical Research*, 99(D8), 16,617–16,632, doi : 10.1029/94JD00021.
- Massman, W. J., and A. Ibrom (2008), Attenuation of concentration fluctuations of water vapor and other trace gases in turbulent tube flow, *Atmos. Chem. Phys.*, 8(20), 6245–6259, doi :10.5194/acp-8-6245-2008.
- Mathon, R. (2010), *Projet MEDEE - Rapport de stage de fin d'études 5GM CMAO INSA Toulouse*, 60 pp., Département Génie Mécanique INSA de Toulouse.
- McCaskill, D., and R. Croteau (1995), Monoterpene and sesquiterpene biosynthesis in glandular trichomes of peppermint (*Mentha x piperita*) rely exclusively on plastid-derived isopentenyl diphosphate, *Planta*, 197(1), 49–56, doi :10.1007/BF00239938.
- McGarvey, D. J., and R. Croteau (1995), Terpenoid metabolism., *The Plant Cell*, 7(7), 1015–1026.
- McKeen, S. A., E.-Y. Hsie, M. Trainer, R. Tallamraju, and S. C. Liu (1991), A regional model study of the ozone budget in the eastern united states, *Journal of Geophysical Research*, 96(D6), 10,809–10,845, doi :10.1029/91JD00052.

- Mitra, A. P. (2004), Indian ocean experiment [INDOEX] : an overview, *Indian Journal of Marine Sciences*, 33(1), 30–39.
- Monson, R. K., M. T. Lerdau, T. D. Sharkey, D. S. Schimel, and R. Fall (1995), Biological aspects of constructing volatile organic compound emission inventories, *Atmospheric Environment*, 29(21), 2989–3002, doi :10.1016/1352-2310(94)00360-W.
- Moore, C. J. (1986), Frequency response corrections for eddy correlation systems, *Boundary-Layer Meteorology*, 37(1-2), 17–35, doi :10.1007/BF00122754.
- Muskardin, T., and F. Rozen (2007), *Mesure rapide de humidité atmosphérique sur un avion de recherche - Rapport de stage de fin d'études de l'ENSICA*, 89 pp., Laboratoire d'aérodynamique, Toulouse.
- Müller, M., M. Graus, T. M. Ruuskanen, R. Schnitzhofer, I. Bamberg, L. Kaser, T. Titzmann, L. Hörtnagl, G. Wohlfahrt, T. Karl, and A. Hansel (2010), First eddy covariance flux measurements by PTR-TOF, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 387–395, doi :10.5194/amt-3-387-2010.
- Owen, S. M., C. Boissard, B. Hagenlocher, and C. N. Hewitt (1998), Field studies of isoprene emissions from vegetation in the northwest mediterranean region, *Journal of Geophysical Research*, 103(D19), PP. 25,499–25,511, doi :199810.1029/98JD01817.
- Rajaonarivony, J. I., J. Gershenzon, and R. Croteau (1992), Characterization and mechanism of (4S)-limonene synthase, a monoterpene cyclase from the glandular trichomes of peppermint (*Mentha x piperita*), *Archives of biochemistry and biophysics*, 296(1), 49–57.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. Lelieveld, A. P. Mitra, D. Althausen, J. Anderson, M. O. Andreae, W. Cantrell, G. R. Cass, C. E. Chung, A. D. Clarke, J. A. Coakley, W. D. Collins, W. C. Conant, F. Dulac, J. Heintzenberg, A. J. Heymsfield, B. Holben, S. Howell, J. Hudson, A. Jayaraman, J. T. Kiehl, T. N. Krishnamurti, D. Lubin, G. McFarquhar, T. Novakov, P. K. Ogren, I. A. Podgorny, K. Prather, K. Priestley, J. M. Prospero, P. K. Quinn, K. Rajeev, P. Rasch, S. Rupert, R. Sadourny, S. K. Satheesh, G. E. Shaw, P. Sheridan, and F. P. J. Valero (2001), Indian ocean experiment : An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great indo-asian haze, *Journal of Geophysical Research*, 106(22), 28,371–28,398.
- Ramanathan, V., P. Crutzen, A. Mitra, and D. Sikka (2002), The indian ocean experiment and the asian brown cloud, *Current Science*, 83, 947–55.
- Rannik, U., and T. Vesala (1999), Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance method, *Boundary-Layer Meteorology*, 91(2), 259–280, doi :10.1023/A:1001840416858.
- Reynolds, O. (1895), On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 186, 123–164, doi :10.2307/90643.
- Rhoades, D. F. (1985), Offensive-defensive interactions between herbivores and plants : Their relevance in herbivore population dynamics and ecological theory, *The American Naturalist*, 125(2), 205–238, doi :10.2307/2461633.

- Rinne, H. J. I., A. C. Delany, J. P. Greenberg, and A. B. Guenther (2000), A true eddy accumulation system for trace gas fluxes using disjunct eddy sampling method, *Journal of Geophysical Research*, 105(D20), PP. 24,791–24,798, doi :200010.1029/2000JD900315.
- Rinne, H. J. I., A. B. Guenther, C. Warneke, J. A. d. Gouw, and S. L. Luxembourg (2001), Disjunct eddy covariance technique for trace gas flux measurements, *Geophysical Research Letters*, 28(16), PP. 3139–3142, doi :200110.1029/2001GL012900.
- Rinne, J., and C. Ammann (2012), Disjunct eddy covariance method, in *Eddy Covariance*, edited by M. Aubinet, T. Vesala, and D. Papale, Springer Atmospheric Sciences, pp. 291–307, Springer Netherlands.
- Rinne, J., T. Douffet, Y. Prigent, and P. Durand (2008), Field comparison of disjunct and conventional eddy covariance techniques for trace gas flux measurements, *Environmental Pollution*, 152(3), 630–635, doi :10.1016/j.envpol.2007.06.063.
- Robertson, G., D. Griffiths, J. Woodford, and A. Birch (1995), Changes in the chemical composition of volatiles released by the flowers and fruits of the red raspberry (*Rubus idaeus*) cultivar glen prosen, *Phytochemistry*, 38(5), 1175–1179, doi : 10.1016/0031-9422(94)00782-O.
- Saïd, F., U. Corsmeier, N. Kalthoff, C. Kottmeier, M. Lothon, A. Wieser, T. Hofherr, and P. Perros (2005), ESCOMPTE experiment : intercomparison of four aircraft dynamical, thermodynamical, radiation and chemical measurements, *Atmospheric Research*, 74(1–4), 217–252, doi :10.1016/j.atmosres.2004.06.012.
- Saïd, F., G. Canut, P. Durand, F. Lohou, and M. Lothon (2010), Seasonal evolution of boundary-layer turbulence measured by aircraft during the AMMA 2006 special observation period, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(S1), 47–65, doi :10.1002/qj.475.
- Schürmann, W., H. Ziegler, D. Kotzias, R. Schönwitz, and R. Steinbrecher (1993), Emission of biosynthesized monoterpenes from needles of norway spruce, *Naturwissenschaften*, 80(6), 276–278, doi :10.1007/BF01135913.
- Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis (1998), *Atmospheric Chemistry and Physics : From Air Pollution to Climate Change*, Wiley, New York.
- Seufert, G., D. Kotzias, C. Sparta, and B. Versino (1995), Volatile organics in mediterranean shrubs and their potential role in a changing environment, *Biodiversity and Conservation*, 6(10), 343–370, doi :10.1023/A:1018302100397.
- Seufert, G. (1997), The BEMA field campaign BUR2 in Burriana, (Valencia), Spain (29 April–5 May 1996), Enclosure measurements of BVOC emission rates from citrus varieties, in *Report on the BEMA Measuring Exercises at Burriana (Valencia-Spain) April–May–September 1996*, Brussels EUR 17336 EN, p. 43–51.
- Sharkey, T., F. Loreto, C. Delwiche, and I. Treichel (1991), Fractionation of carbon isotopes during biogenesis of atmospheric isoprene, *Plant Physiology*, 97(1), 463–466, doi : 10.1104/pp.97.1.463.

- Sharkey, T. D. (1991), Stomatal control of trace gas emissions, in T. D. Sharkey, E. A. Holland, and H. A. Mooney (eds), *Trace Gas Emissions from Plants*, Academic Press, San Diego, p. 335–339.
- Sharkey, T. D. (1996), Emission of low molecular mass hydrocarbons from plants, *Trends in Plant Science*, 1(3), 78–82, doi :10.1016/S1360-1385(96)80038-0.
- Shulaev, V., P. Silverman, and I. Raskin (1997), Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance, , *Published online : 20 February 1997*; / doi :10.1038/385718a0, 385(6618), 718–721, doi :10.1038/385718a0.
- Sillman, S. (1999), The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment*, 33(12), 1821–1845, doi :10.1016/S1352-2310(98)00345-8.
- Silver, G. M., and R. Fall (1991), Enzymatic synthesis of isoprene from dimethylallyl diphosphate in aspen leaf extracts, *Plant Physiology*, 97(4), 1588–1591, doi :10.1104/pp.97.4.1588.
- Simon, V., L. Dumergues, P. Bouchou, L. Torres, and A. Lopez (2005), Isoprene emission rates and fluxes measured above a mediterranean oak (*Quercus pubescens*) forest, *Atmospheric Research*, 74(1-4), 49–63, doi :10.1016/j.atmosres.2004.04.005.
- Simon, V., L. Dumergues, J.-L. Ponche, and L. Torres (2006), The biogenic volatile organic compounds emission inventory in france : Application to plant ecosystems in the berre-marseilles area (France), *Science of The Total Environment*, 372(1), 164–182, doi : 10.1016/j.scitotenv.2006.08.019.
- Simpson, D., A. Guenther, C. N. Hewitt, and R. Steinbrecher (1995), Biogenic emissions in europe : 1. estimates and uncertainties, *Journal of Geophysical Research*, 100(D11), 22,875–22,890, doi :10.1029/95JD02368.
- Simó, R., and J. Dachs (2002), Global ocean emission of dimethylsulfide predicted from biogeophysical data, *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 1018, doi :10.1029/2001GB001829.
- Singh, H. B., and P. B. Zimmerman (1992), Atmospheric distribution and sources of nonmethane hydrocarbons, *Gaseous Pollutants : Characterization and Cycling*; John Wiley and Sons, Inc. ; New York, p. 59.
- Singsaas, E. L., M. Lerdau, K. Winter, and T. D. Sharkey (1997), Isoprene increases thermotolerance of isoprene-emitting species., *Plant Physiology*, 115(4), 1413–1420.
- Sokoloff, G. (2010), *Développement de la gestion et de l'acquisition des données de l'instrument MEDEE - Rapport de stage de fin d'études IUP ISME*, 18 pp., Laboratoire d'Aérologie.
- Soler, E., G. Feron, M. Clastre, R. Dargent, M. Gleizes, and C. Ambid (1992), Evidence for a geranyl-diphosphate synthase located within the plastids of vitis vinifera l. cultivated in vitro, *Planta*, 187(2), 171–175, doi :10.1007/BF00201934.

- Srinivasan, J., and S. Gadgil (2002), Asian brown cloud : Fact and fantasy, *Current Science*, 83(5), 586–592.
- Staudt, M., N. Bertin, U. Hansen, G. Seufert, P. Cicciolij, P. Foster, B. Frenzel, and J.-L. Fugit (1997), Seasonal and diurnal patterns of monoterpene emissions from pinus pinea (L.) under field conditions, *Atmospheric Environment*, 31, Supplement 1(0), 145–156, doi :10.1016/S1352-2310(97)00081-2.
- Staudt, M., N. Bertin, B. Frenzel, and G. Seufert (2000), Seasonal variation in amount and composition of monoterpenes emitted by young pinus pinea trees – implications for emission modeling, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 35(1), 77–99, doi :10.1023/A:1006233010748.
- Steinbrecher, R., K. Hauff, R. Rabong, and J. Steinbrecher (1997), Isoprenoid emission of oak species typical for the mediterranean area : Source strength and controlling variables, *Atmospheric Environment*, 31(Supplement 1), 79–88, doi :10.1016/S1352-2310(97)00076-9.
- Street, R., S. Owen, S. Duckham, C. Boissard, and C. Hewitt (1997), Effect of habitat and age on variations in volatile organic compound (VOC) emissions from quercus ilex and pinus pinea, *Atmospheric Environment*, 31, Supplement 1(0), 89–100, doi : 10.1016/S1352-2310(97)00077-0.
- Stull, R. B. (1988), *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 692 pp., Springer.
- Tarayre, M., J. D. Thompson, J. Escarré, and Y. B. Linhart (1995), Intra-specific variation in the inhibitory effects of thymus vulgaris (Labiatae) monoterpenes on seed germination, *Oecologia*, 101(1), 110–118, doi :10.2307/4220859.
- Tingey, D. T., D. P. Turner, and J. A. Weber (1991), Factors controlling the emissions of monoterpenes and other volatile organic compounds, *Trace Gas Emissions from Plants*, Academic Press, p. 93–119.
- Turlings, T. C., J. H. Tumlinson, and W. J. Lewis (1990), Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps, *Science (New York, N.Y.)*, 250(4985), 1251–1253, doi :10.1126/science.250.4985.1251.
- Turnipseed, A. A., S. N. Pressley, T. Karl, B. Lamb, E. Nemitz, E. Allwine, W. A. Cooper, S. Shertz, and A. B. Guenther (2009), The use of disjunct eddy sampling methods for the determination of ecosystem level fluxes of trace gases, *Atmos. Chem. Phys.*, 9(3), 981–994, doi :10.5194/acp-9-981-2009.
- Vapnik, V. (1995), *The Nature of Statistical Learning Theory*, Information Science and Statistics, 314 pp., Springer.
- Warneke, C., S. L. Luxembourg, J. A. d. Gouw, H. J. I. Rinne, A. B. Guenther, and R. Fall (2002), Disjunct eddy covariance measurements of oxygenated volatile organic compounds fluxes from an alfalfa field before and after cutting, *Journal of Geophysical Research*, 107, 10 PP., doi :200210.1029/2001JD000594.

- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning (1980), Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447), 85–100, doi :10.1002/qj.49710644707.
- Wilczak, J. M., S. P. Oncley, and S. A. Stage (2001), Sonic anemometer tilt correction algorithms, *Boundary-Layer Meteorology*, 99(1), 127–150, doi :10.1023/A:1018966204465.
- Yokouchi, Y., and Y. Ambe (1984), Factors affecting the emission of monoterpenes from red pine (*Pinus densiflora*), *Plant Physiology*, 75(4), 1009–1012, doi :10.1104/pp.75.4.1009.

Annexe A

Cahier des charges du système de prélèvement de MEDEE

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 1/65</p>
---	---	---



**CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE
PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE
"MEDEE"**

Signature:	
Prepared by:	
N. Striebig (GIS-UMS831)	
C. Jambert (LA-UMR5560)	
P. Durand (LA-UMR5560)	
C. Jarnot (LA-UMR5560)	
L. Liu (LA-UMR5560)	
V. Lagorse (LA-UMR5560)	
Approved and authorized by:	
C. Jambert (LA-UMR5560)	
P. Durand (LA-UMR5560)	

Summary : Ce document est le cahier des charges fonctionnel du système de prélèvement et préparation pour analyse d'échantillons d'air pour l'instrument aéroporté "MEDEE".

Keywords : DEC (Disjunct Eddy Correlation), Aéroporté, Mesure de flux turbulents, Analyseurs, ATR-42

DISTRIBUTION LIST

PROJECT	EXTERNAL DISTRIBUTION
Corinne JAMBERT Christian JARNOT Vincent LAGORSE Lei LIU Pierre DURAND Driss KOUACH	SAFIRE CNRM

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 2/65</p>
---	---	---

- TABLE DES MATIERES -

1. INTRODUCTION.....	3
2. DOCUMENTATION.....	3
2.1. DOCUMENTS APPLICABLES.....	3
2.2. DOCUMENTS A FOURNIR.....	3
2.3. DOCUMENTS DE REFERENCE.....	3
3. CONTEXTE.....	4
3.1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES.....	4
3.2. LE PROJET MEDEE AEROPORTEE.....	5
3.3. SCHEMA DE PRINCIPE DE LA DEC.....	6
3.4. LES ETUDES DEJA EFFECTUEES.....	6
3.5. ETUDES MENEES SUR DES SUJETS VOISINS.....	8
3.6. SUITES PREVUES.....	8
3.7. NATURE DES PRESTATIONS DEMANDEES.....	8
3.8. PARTIES CONCERNEES PAR LE DEROULEMENT DU PROJET ET SES RESULTATS.....	8
3.9. CARACTERE CONFIDENTIEL.....	9
4. ENONCE DU BESOIN.....	9
5. ENVIRONNEMENT DU PRODUIT.....	10
5.1. LES ETAPES DU CYCLE DE VIE.....	10
5.2. CARACTERISTIQUES POUR CHAQUE ELEMENT DE L'ENVIRONNEMENT.....	11
6. EXPRESSION FONCTIONNELLE DU BESOIN.....	24
6.1. FONCTIONS DE SERVICE ET CONTRAINTE.....	24
6.1.1. Test d'analyseur.....	24
6.1.2. Intégrer le système de prélèvement d'échantillon d'air.....	24
6.1.3. Test de l'instrument au sol.....	25
6.1.4. Campagnes de mesures aux sols (phase opérationnelle).....	25
6.1.5. Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42).....	26
6.1.6. Phases de décollage/Atterrissage de l'avion.....	26
6.1.7. Campagnes de mesures dans l'avion ATR-42 (phase opérationnelle).....	26
6.1.8. Gestion des données.....	27
6.1.9. Maintenance.....	27
6.1.10. Transports.....	27
6.1.11. Stockage.....	27
6.1.12. Recyclage.....	27
6.2. CRITERES D'APPRECIATION ET LES NIVEAUX DES CRITERES D'APPRECIATION.....	28
6.2.1. Test d'analyseur.....	28
6.2.2. Intégrer le système de prélèvement d'échantillon d'air.....	28
6.2.3. Test de l'instrument au sol.....	29
6.2.4. Campagnes de mesures aux sols (phase opérationnelle).....	32
6.2.5. Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42).....	35
6.2.6. Phases de décollage/Atterrissage de l'avion.....	39
6.2.7. Campagnes de mesures dans l'avion ATR-42 (phase opérationnelle).....	39
6.2.8. Gestion des données.....	42
6.2.9. Maintenance.....	42
6.2.10. Transports.....	43
6.2.11. Stockage.....	43
6.2.12. Recyclage.....	43
7. VOIES TECHNOLOGIQUES.....	44

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 3/65</p>
---	---	---

1. INTRODUCTION

Ce document constitue le cahier des charges fonctionnel du système de prélèvement et de préparation pour analyse d'échantillons d'air, pour l'instrument Aéroportée MEDEE (Mesure par Echantillonnage Disjoint des Echanges d'Espèces en trace).

Il résulte d'une analyse fonctionnelle, menée avec un groupe de travail, composé des personnes suivantes :

Corinne Jambert	LA	
Christian Jarnot	LA	
Lei Liu	LA	
Pierre Durand	LA	
Vincent Lagorse	LA	
Nicolas Striebig	GIS	(Animateur du groupe de travail).

2. DOCUMENTATION

2.1. Documents applicables

DA-1 : Instruction pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués dans les avions SAFIRE (F20, ATR42, Piper Aztec).

<http://www.safire.fr>

2.2. Documents à fournir

DF-1 : « Description instrumentale ». Ce dossier est à remplir par l'utilisateur et précise les caractéristiques des instruments en vue de leur intégration dans l'avion. Le document comprend informations techniques, précaution d'emploi, utilisation, procédures pour les vols, acquisition et visualisation des données. Ce document est à fournir à SAFIRE au minimum six mois avant l'installation dans l'avion. Ceci comprend la certification et la mise au point logicielle pour l'acquisition et le traitement des données issues de ces instruments.

http://www.safire.fr/article.php3?id_article=18

DF-2 : « Déclaration de conformité Instrument Scientifique ». Ce document devra être fourni à SAFIRE avec l'instrument lors de sa livraison à SAFIRE. Il engage le chef de laboratoire et le responsable technique de l'instrument sur la conformité de celui-ci à la description qui en a été faite.

http://www.safire.fr/article.php3?id_article=18

2.3. Documents de référence

DR-1 : J.Rinne, T. Douffet, Y. Prigent and P. Durand, 2008, « Field comparison of disjunct and conventional eddy covariance technics for trace gas flux measurements », Environmental Pollution, 152, 630-635.

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 4/65
---	---	---

DR-2 : Rapport de stage du DESS MISSAO de Karl LEMARCHAND, « Mise en place d'une campagne d'inter comparaison des flux pour valider la méthode DEC et Etude de la faisabilité de mesures de flux d'aérosols ».

DR-3 : T. Karl, E Appel, A. Hodzic, D. Riemer, D. Blake, C. Wiedinmyer, 2008, « Emissions of Volatile Organic Compounds inferred from airborne flux measurements over a megacity », *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 14273-14309.
<http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/14273/2008/>

DR-4 : D.M.D. Hendriks, A.J. Dolman, M.K. van der Molen, and J. van Huissteden, 2008, « A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy », *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 431-443..
www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/431/2008/

DR-5 : A. Schmidt and O. Klemm, 2008, « Direct determination of highly size-resolved turbulent particle fluxes with the disjunct eddy covariance method and a 12 – stage electrical low pressure impactor ». *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8997-9034.
www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/8997/2008/

DR-6 : A. A. Turnipseed, S. N. Pressley, T. Karl, B. Lamb, E. Nemitz, E. Allwine, W. A. Cooper, S. Shertz, and A. B. Guenther, 2009, « The use of disjunct eddy sampling methods for the determination of ecosystem level fluxes of trace gases », *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 981-994.
www.atmos-chem-phys.net/9/981/2009/

DR-7 : B. Langford, B. Davison, E. Nemitz, and C. N. Hewitt, 2008, « Mixing ratios and eddy covariance flux measurements of volatile organic compounds from an urban canopy », *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 245-284.
www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/245/2008/

DR-8 : T W. Grabmer, M. Graus, C. Lindinger, A. Wisthaler, B. Rappengluck, R. Steinbrecher, A. Hansel, 2004, « Disjunct eddy covariance measurements of monoterpene fluxes from a Norway spruce forest using PTR-MS », *International Journal of Mass Spectrometry* 239, 111-115.

3. CONTEXTE

3.1. Objectifs scientifiques

Les études sur le climat et en chimie de l'atmosphère nécessitent des inventaires d'émissions afin de modéliser l'évolution des masses d'air au cours de leur transport. Si les émissions anthropiques (transport, émissions industrielles, ...) sont relativement bien cernées et évaluées, les émissions biogènes dépendent de facteurs environnementaux (température, insolation, espèces végétales, ...), variables dans le temps et l'espace. Les études de chimie/transport à l'échelle régionale ont montré la forte dépendance des émissions biogènes sur la production d'ozone, de formaldéhyde ou de PANs (Cortinovis et al, 2005, Moukhtar S. et al, 2005).

Le programme ChArMEx (Chemistry – Aerosol Mediterranean Experiment) vise à mener des études de dynamique et de chimie de l'atmosphère, d'impact des aérosols sur le rayonnement ... à

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 5/65</p>
---	---	--

l'échelle du bassin méditerranéen. Les émissions et dépôts des composés réactifs sont des entrées/sorties importantes pour le calcul du bilan chimique dans le domaine d'étude; en particulier, les différents composés biogènes peuvent influencer la réactivité chimique et conduire à la formation d'aérosols secondaires.

La mesure de flux (d'émission ou de dépôt) de référence est basée sur la méthode Eddy-Covariance (EC), applicable si une mesure rapide (10 Hz) du scalaire est disponible, en même temps que la mesure de la vitesse verticale de l'air w' . Le flux est alors exprimé par le calcul de la covariance $\overline{w'c'}$. Or de nombreux composés d'intérêt ne possèdent pas d'instrumentation adaptée à ce type de mesure, car trop lente. Certains, cependant, sont mesurables avec une bonne précision et une fréquence de l'ordre du Hertz. Dans ce cas, une nouvelle méthode Disjunct Eddy Covariance (DEC) peut permettre la détermination des flux avec une bonne précision (Rinne et al., 2008, Lemarchand, 2003). Elle consiste à compenser l'insuffisance du temps de réponse de l'analyseur en réalisant dans un réservoir intermédiaire une capture rapide d'un échantillon d'air qui est analysé en léger différé par un analyseur en ligne (fig.1). Le résultat des analyses est ensuite corrélé avec les vitesses verticales mesurées (ou calculées) au moment des captures.

L'estimation d'un flux moyen $\overline{w'c'}$ sur 15 minutes nécessite au moins quelques dizaines d'échantillons. L'application de cette méthode à la mesure aéroportée doit permettre, dans une étape ultérieure, d'évaluer les émissions et dépôts de composés atmosphériques au dessus de surfaces relativement homogènes, telles que des écosystèmes forestiers ou agricoles.

3.2. Le projet MEDEE Aéroportée

C'est la mesure aéroportée de flux turbulents de composés gazeux pour analyseurs moyennement rapides (temps de réponse de l'ordre 0,1 à 1 Hz) pour lesquels la méthode Eddy-Correlation n'est pas possible. Cette dernière nécessite un analyseur capable de réaliser des mesures à des fréquences suffisantes (environs 10Hz) avec la sensibilité et la précision adéquates, ce qui n'est pas notre cas.

Le projet MEDEE est basé sur la méthode Disjuncts Eddy-Covariance (DEC), qui consiste à capturer rapidement des échantillons d'air pour ensuite en analyser le contenu lentement par l'analyseur moyennement rapide. Le résultat est corrélé ensuite avec la vitesse verticale de l'air mesurée au moment de la capture.

Le projet est orienté vers la mesure de flux de composés organiques volatiles biogènes : CH₄ + isoprène + terpènes (+ composés oxygénés).

- ❖ Isoprène (C₅H₈) : Analyseur rapide (Fast Isoprene Sensor : FIS) existe au laboratoire pour évaluer le système par rapport à la méthode Eddy-Correlation.
- ❖ Méthane (CH₄) : L'instrument rapide (20 Hz) DLT-100FMA est disponible au laboratoire.
- ❖ Terpènes ([C₅H₈]_n) : Les analyses rapides sont possibles par PTR/MS (Proton Transfert/Mass Spectroscopy). L'instrument étant très onéreux, il est envisagé de collaborer avec des laboratoires de la communauté française, afin d'obtenir la possibilité d'utiliser cet appareil couplé au système MEDEE..

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 6/65
---	---	---

3.3. Schéma de principe de la DEC

Ci-après on trouvera le schéma de principe de la DEC pour la mesure de flux turbulents de composés atmosphériques.

La boîte noire (le sujet de l'étude) est le système servant au prélèvement d'échantillon d'air, à l'injection dans l'analyseur et à la vidange d'échantillon d'air.

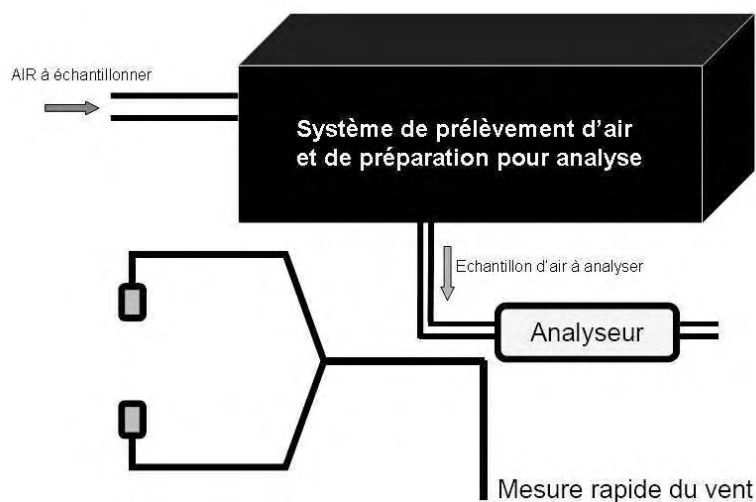


Figure 1. Schéma de principe de la DEC

Pour le fonctionnement en avion, les données de température et vitesse de l'air seront mesurées et fournies par l'avion.

Pour le fonctionnement au sol, ces données devront être mesurées et fournies par l'instrument lui-même; un système complet est obligatoire pour la version sol.

3.4. Les études déjà effectuées

Prototype réalisé par Météo-France

Un prototype (figure 2) a été construit par Météo France pour valider le principe de mesure de la DEC sur les composants H₂O et CO₂ au sol.

L'appareil se compose de :

- ❖ un système de prélèvement
- ❖ quatre électrovannes d'analyse (Buschjost, 0-2bar, 24V, 12W)
- ❖ un analyseur (LICOR 6262)
- ❖ un anémomètre sonique, d'une sonde (PTU200)
- ❖ une pompe externe pour l'analyseur (KNF-NEUBERGER, type NMP30 KNDC, 12V, 0,5A, 1bar max)

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 7/65</p>
---	---	---

Le système de prélèvement comprend :

- ❖ deux bouteilles de prélèvement (EM-TECHNIK GMBH, D-67100 Maxdorf)
- ❖ quatre électrovannes rapides (Burkert, 24V, G1/2, DN15, 24V, 0-1bar, 9W)
- ❖ deux capteurs de pression (PMP 1400 GE Sensing)
- ❖ une pompe à vide (pompe à huile).

Les deux bouteilles fonctionnent en alternance. L'air est prélevé rapidement en 0,2s, par une électrovanne rapide, dans la première bouteille qui est prévue à 25-40mbar. Pendant le temps d'analyse de la première bouteille, la deuxième bouteille se vide et attend la fin d'analyse de la première. Et le cycle se répète avec la 2^{ème} bouteille.

Pendant l'analyse, les électrovannes d'analyses sont ouvertes et les électrovannes d'ouverture et vidange sont fermées. Au moment du prélèvement, seule l'électrovanne d'ouverture est ouverte, pendant la vidange seule l'électrovanne de vidange est ouverte.

Au début du cycle, la pompe à vide est mise en marche en premier, puis on assure la mise en pression atmosphérique des deux bouteilles et du circuit d'analyse.

En fin de cycle, on éteint la pompe à vide, puis on met en pression les bouteilles et le circuit d'analyse. Ces étapes sont essentielles à la sécurité du LICOR 6262 qui est fragile et n'accepte pas de grande dépression.

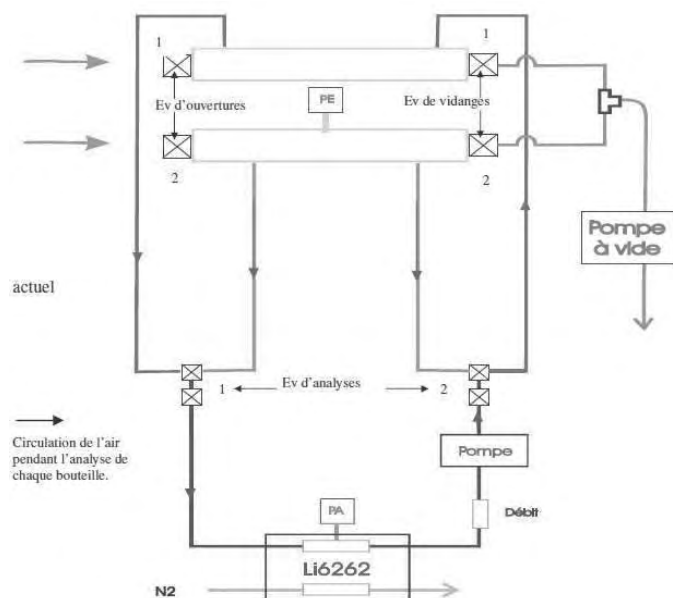


Figure 2. Schéma de principe de la DEC du prototype de Météo France

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 8/65</p>
---	---	---

3.5. Etudes menées sur des sujets voisins

Prototype (REA) réalisé par CNRM

Une étude se basant sur la méthode REA (Relaxed Eddy Accumulation) a été menée pour mesurer le flux au sol. Les flux turbulents sont mesurés en utilisant la différence en concentration entre les sacs d'échantillons d'air accumulé pendant updrafts et downdrafts. Un prototype de l'instrument a été développé au Centre National de Recherches Météorologies (CNRM).

Prototype (DEC) réalisé par Dr. Brian Davison et Ben langford de l'université Lancaster, UK.

L'instrument (figure3) est basé sur « Disjunct Eddy Covariance » pour la détermination de flux COV par l'analyseur PTR-MS.

http://www.accent-network.org/farcry_accent/download.cfm?DownloadFile=C76B7930-BCDC-BADI-A47B24E321E2760C

<http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/245/2008/>

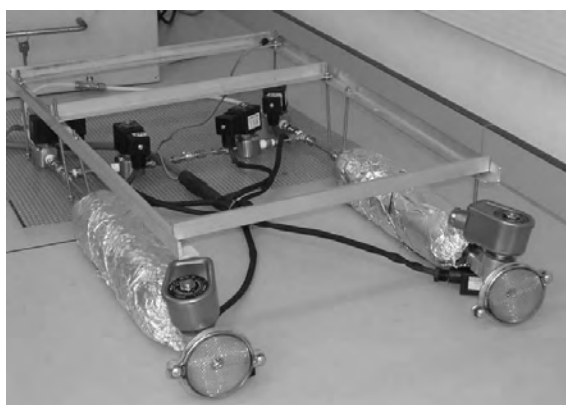


Figure 3. L'instrument de mesure basé sur DEC

3.6. Suites prévues

L'extension de mesure à d'autres composés : aérosols et autres composants gazeux (Oxyde d'azote, ozone...).

3.7. Nature des prestations demandées

Réalisation à terme d'un modèle pour octobre 2010, dans sa version sol, et pour avant l'été 2011 dans sa version aéroportée (ce sera le même instrument).

3.8. Parties concernées par le déroulement du projet et ses résultats

Membres du laboratoire d'aérologie (demandeur et utilisateur)

Les collaborateurs (Pour analyseur PTR-MS ou autres)

CNRM (expert consultant)

SAFIRE (service des avions de recherche français)

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 9/65</p>
---	---	---

3.9. Caractère confidentiel

La consultation des documents et l'utilisation de l'appareil restent à l'observatoire Midi-Pyrénées. Un protocole sera défini pour le partage des données.

4. ENONCE DU BESOIN

L'instrument devra fonctionner dans l'avion (ATR-42 de l'unité SAFIRE) ou au sol (campagnes de mesure au sol). Il devra être capable de fonctionner automatiquement en continu pendant plusieurs semaines (AD) pour l'utilisation au sol et environ 5 heures dans le cas d'une utilisation en avion. Des interventions pour maintenance pourront être réalisées lors des longues campagnes au sol.

Le système de prélèvement d'air devra permettre à l'instrument DEC Aéroportée une capture rapide d'échantillon d'air tout en favorisant la transmission à l'analyseur sans altération.

La méthode DEC (Disjunct Eddy-Covariance) consiste à compenser l'insuffisance de la fréquence de mesure de l'analyseur en réalisant dans un réservoir intermédiaire une capture rapide d'un échantillon d'air qui est analysé en léger différé par un analyseur moyennement rapide.

Le système devra permettre l'analyse des composés organiques volatiles biogènes (COV) : CH₄ + isoprène + terpènes (+ composés oxygénés).

L'instrument capture un échantillon d'air à un moment précis dans un réservoir. L'analyseur aspire l'échantillon pour l'analyser et la pression d'air à l'entrée de l'analyseur devra être maîtrisée (besoin lié aux analyseurs). A la fin de l'analyse, le réservoir doit être vidé à une pression inférieure à 40 mbar.

La capture d'échantillon d'air devra se faire de façon cyclique en moins de 0,2 seconde à un intervalle minimum à définir (entre 1 et 60 secondes). Chaque échantillon devra être daté et synchronisé avec les mesures de vent (celles de l'avion ou celles au sol pour les manips au sol).

Le besoin pour une estimation de flux est d'au minimum 50-60 échantillons. La base de temps minimum sera celle déterminée par l'analyseur faisant l'analyse (plusieurs analyseurs envisagés) et l'intervalle de temps minimum entre 2 captures d'échantillons.

L'instrument devra s'adapter à différents analyseurs (FIS et PTR-MS principalement) (différents débits de pompage d'analyse, différents temps d'analyse et donc différents volumes d'air nécessaires).

La prise d'échantillon devra être la plus proche possible du capteur de vitesse de l'air. Le volume d'échantillonnage doit être le plus faible possible.

L'instrument DEC Aéroportée devra à terme respecter les contraintes aéroportées, en collaboration avec l'unité SAFIRE qui gère les avions de recherche français.

L'instrument devra être réalisé, testé et opérationnel avant octobre 2010, dans sa configuration sol. Pour la configuration aéroportée, il devra être opérationnel avant l'été 2011.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 10/65</p>
---	---	--

5. ENVIRONNEMENT DU PRODUIT

Nous décrirons ci-après succinctement (mais exhaustivement) les principales étapes du cycle de vie de l'instrument DEC Aéroportée. Ces phases du cycle de vie regroupent l'ensemble des situations dans lesquelles se trouve le dispositif de prélèvement d'air pendant sa durée de vie.

Nous définirons ensuite les caractéristiques pour chaque élément de l'environnement en relation avec le produit.

5.1. Les étapes du cycle de vie

Tests de(s) analyseur(s)

Les différents analyseurs seront testés et étalonnés en laboratoire. On se servira également de ce moment pour extraire les différents paramètres nécessaires au bon fonctionnement de l'instrument.

Intégrer le système de prélèvement d'échantillon d'air

Le système de prélèvement d'échantillon sera assemblé au laboratoire. Sur table dans un premier temps, puis dans la baie ATR-42 dans un second temps. Si nécessaire il sera directement installé dans la baie. Il faudra tout de même s'assurer de la compatibilité des différentes utilisations ; au sol ou dans l'avion.

Tests de l'instrument au sol

Des premiers tests en laboratoire seront réalisés avec l'(es) analyseur(s). Ensuite, des tests en grandeur nature sur le terrain seront effectués. Ces tests devront valider l'instrument pour son utilisation au sol et dans l'avion.

Campagnes de mesures au sol (phase opérationnelle)

L'instrument devra réaliser aussi bien des campagnes de mesures en avion ou au sol. Le calendrier, les lieux et la durée des campagnes restent à définir (AD). Les mesures se feront en continu pendant plusieurs semaines (possibilité d'interruption pour maintenance lors des campagnes au sol).

Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42)

L'instrument sera en configuration 'avion' (pré-intégré dans sa baie) pour être intégré dans l'avion ATR-42 de l'unité SAFIRE. Il sera raccordé électriquement (puissance & acquisition) et mécaniquement à l'avion, ainsi qu'aux différentes entrées/sorties d'air.

Phases de décollage/Atterrissage de l'avion

L'instrument devra être dans une certaine configuration à définir avec l'unité SAFIRE durant ces phases. Aussi, il devra résister aux contraintes mécaniques et électriques de ces différentes phases.

Campagnes de mesures dans l'avion ATR-42 (phase opérationnelle)

L'instrument devra fonctionner de manière automatique et continue. Pour un fonctionnement dans l'avion, l'instrument devra fonctionner pendant plusieurs heures (5H env.).

Une interface devra indiquer aux différents utilisateurs le bon fonctionnement de l'instrument en cours de mesures.

Gestion des données

L'instrument nous fournira un certain nombre de données (AD), elles seront stockées par l'instrument lui-même (en totalité pour les campagnes au sol, en grande partie pour les campagnes

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 11/65</p>
---	---	--

avion). Les données devront pouvoir être rapatriées (pour traitement ou vérification) en cours de mesures pour le fonctionnement au sol et à la fin des mesures pour le mode avion.

Maintenance

L'instrument devra être facilement entretenu. Cette maintenance sera faite au laboratoire et consistera au nettoyage de l'instrument et au remplacement de pièces d'usures.

Transports

L'instrument sera transporté pour réaliser les différentes campagnes au sol ou en avion.

Plusieurs transports aller/retour sont à envisager, avec des configurations peut être différentes suivant les campagnes (AD).

Stockage

L'instrument sera stocké au laboratoire, l'analyseur sera stocké à part et le reste de la configuration reste à définir (AD).

Recyclage

A la fin de la vie de l'instrument, on procèdera à son démantèlement et au recyclage des différentes pièces de l'instrument.

5.2. Caractéristiques pour chaque élément de l'environnement

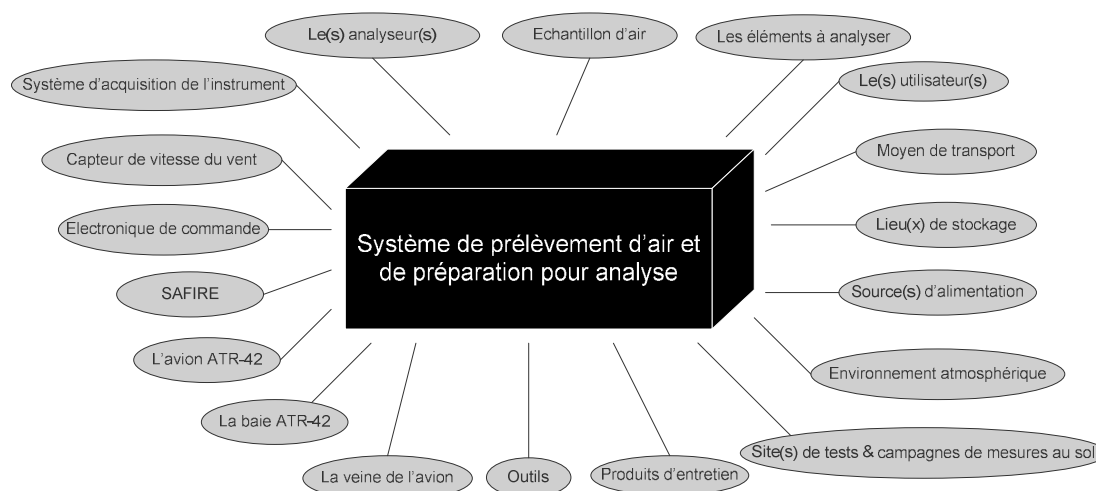


Figure. 4 Interaction entre le système de prélèvement et son environnement

Les éléments à analyser

Composés Organiques Volatils (COV) : Alcane, Alcène, Alcyne, Aromatiques...

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 12/65
---	---	--

Composés Organiques Volatils oxygénés (COVO).

Le(s) analyseur(s)

Différents analyseurs seront utilisés, ci-après le descriptif des 2 principaux (les autres analyseurs restent à décrire):

	FIS	PTR-MS
Temps de réponse (s)	0,4s to 90% (0,2s possible), inversement proportionnel au débit d'air	0,1s
Fréquence (Hz)	0,05-10 (2Hz nominal)	0,02-10
Débit	0,15-4L/min	50-500ml/min
Sensitivité	200 pptv	30pptv
Linéarité	R=0,997 ¹	5pptv (ou 30pptv) – 10ppmv
Sensitivité pour vibration	négligeable	NC
Poids (kg)	18+22 (ozoniseur)	140
Température d'échantillon (°C)	NC	30-150
Température d'opération (°C)	NC	40-120
Tension	90-250 VAC 50-65Hz	100-230V
Limite de détection	500pptv en 1s	10pptv en 1min 100pptv en 1s
Résolution	Meilleur que 100pptv ou 5% de signal	<1amu
Précision	100 pptv ou 5% de signal	NC
Dimension (cm)	620W*220H*530D (FIS) 510W*135H*465D (ozoniseur)	550W*860H*780D
Interface	1 sortie numérique (RS232) 3 sorties analogiques	1 Ethernet 10/100Mbit RJ45 (TCP/IP) 1 RS 232 5 sorties numériques
Alimentation	90-250VAC, 50-65Hz	100-230V
Power	298 W + 360W (ozoniseur)	Max 750W
Drift	Zero drift (<400photon s-1 day-1) et span drift 5%/week)	NC

Pour le fonctionnement en avion et dans le cas de l'analyseur FIS, il sera installé dans la même baie que le système de prélèvement. Lors de l'utilisation de l'analyseur PRS-MS, il sera installé dans une autre baie à cause de son encombrement.

¹ Mesuré avec un flux d'air 3,46slpm (3,46l/min en P_{atm} et 20°C), fréquence d'analyse 1Hz, 45 secondes en chaque concentration.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 13/65</p>
---	---	--

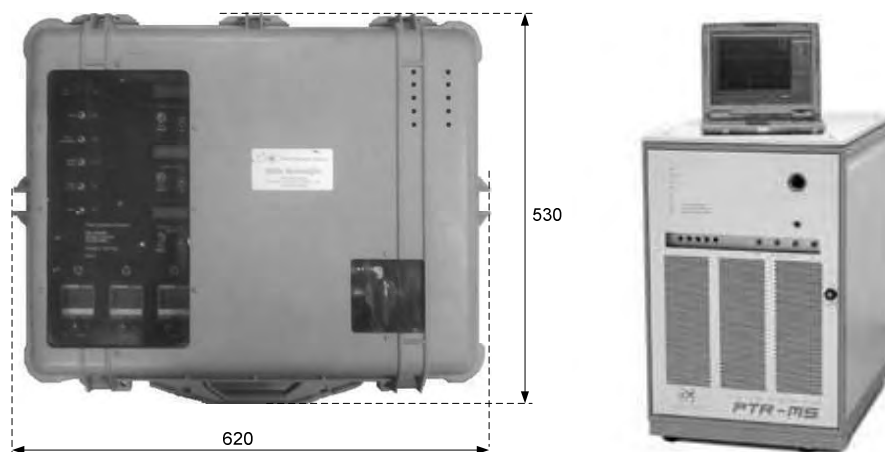


Figure 5. Analyseur FIS (gauche) et PTR-MS (droite)

Electronique de commande

C'est le système électronique qui va piloter le fonctionnement de l'instrument et plus particulièrement le système de prélèvement d'air.

Son étude sera faite en parallèle du système de prélèvement d'air.

Système d'acquisition de l'instrument

C'est le système qui va gérer les différents enregistrements des données de l'instrument.

Il va notamment enregistrer le moment où l'échantillon d'air sera prélevé dans l'instrument, la pression à différents endroits de l'instrument...Son cahier des charges est en cours de réalisation.

SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement)

SAFIRE regroupe les moyens humains, financiers et les trois avions de recherche du CNRS/INSU, de Météo-France et du CNES. L'unité a pour mission de mettre en œuvre ces avions au profit de la recherche dans le cadre des campagnes expérimentales.

SAFIRE est une Unité Mixte de Service (UMS n°2859). Les personnels de SAFIRE sont salariés de Météo-France et du CNRS mais les trois organismes participent à même hauteur aux frais de fonctionnement de l'unité.

Après de nombreuses années de collaboration entre les services de recherche aéroportée de Météo-France et du CNRS, il a été décidé de mutualiser les efforts et de créer cette entité SAFIRE. La date officielle de création de l'unité est le 10 Février 2005.

L'unité est principalement localisée sur la base aérienne de Francazal (Toulouse) mais aussi dans les locaux de l'INSU/DT à Meudon près de Paris.

Les avions gérés par SAFIRE sont : ATR 42, Falcon 40 et Piper Aztec.

Les réglementaires de conception, de production, de l'installation et remise en service, et d'engagement mutuel sont précisés en page 2-3 « 1. Préambule réglementaire » du document « Instructions pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués » (DA-1).

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 14/65</p>
---	---	--

Processus de conception et d'installation

Conception :

Dans le cadre d'une conception ou de modification d'un équipement, l'utilisateur doit tenir compte des informations données dans ce document. Il doit également contacter SAFIRE pour que le processus de conception et de fabrication de ses équipements soit optimisé.

Toutes les informations de conception (plans mécaniques et électriques, masses, consommations, etc.) doivent être fournies à SAFIRE au minimum 6 mois avant l'installation dans l'avion. SAFIRE devant présenter chaque modification des avions (l'installation d'un nouvel équipement est une modification) aux autorités compétentes, si ce délai n'est pas respecté cela peut entraîner un retard ou une annulation du projet.

Installation :

Une revue avant installation est effectuée par SAFIRE pour finaliser les équipements. Une pesée est effectuée avant la montée dans l'avion pour vérifier les valeurs précédemment fournies. Les nouveaux équipements doivent au minimum être fournis 1 mois avant le premier vol.

Modification des avions :

Il est fortement conseillé d'utiliser les modifications des avions déjà existantes pour installer de nouveaux équipements. En effet, modifier à nouveau une partie de l'avion est une solution à la fois très coûteuse en temps et en argent. Le futur utilisateur devra prendre à son compte la totalité des frais occasionnés. Il faut donc prendre contact avec SAFIRE le plus tôt possible pour tout renseignement.

Vols de contrôle et essais :

Un ou plusieurs vols de contrôle peuvent être nécessaires lors de l'installation d'un nouvel équipement. Un vol de contrôle de non perturbation électromagnétique est généralement nécessaire. Dans le cas d'installation de sondes extérieures, des vols d'essais peuvent être à prévoir, augmentant le délai d'installation et les frais occasionnés.

Documents à remplir et à fournir pour l'équipe SAFIRE²

1. « Description instrumentale » (DF-1). Ce dossier est à remplir par l'utilisateur et précise les caractéristiques des instruments en vue de leur intégration dans l'avion. Le document comprend informations techniques, précaution d'emploi, utilisation, procédures pour les vols, acquisition et visualisation des données. Ce document est à fournir à SAFIRE au minimum six mois avant l'installation dans l'avion. Ceci comprend la certification et la mise au point logicielle pour l'acquisition et le traitement des données issues de ces instruments.
2. « Déclaration de conformité Instrument Scientifique » (DF-2). Ce document devra être fourni à SAFIRE avec l'instrument lors de sa livraison à SAFIRE. Il engage le chef de laboratoire et le responsable technique de l'instrument sur la conformité de celui-ci à la description qui en a été faite.

² Voir Annexe les exemplaires des documents à fournir.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 15/65</p>
---	---	---

La baie ATR-42

Les instruments scientifiques sont installés dans des baies qui sont fixées sur des rails de sièges originaux dans le couloir tout au long de la cabine. La baie permet l'empot de matériel de format 19 pouces rackables.

Masse de la baie	21 Kg
Masse maximale des instruments admissible par baie (centre de gravité à mi-hauteur)	120 Kg
Dimensions (intérieures)	576W*1304H*565D (19 pouces, 29U)

On monte les baies soit totalement équipées soit vides par la porte cargo qui se trouve à l'avant gauche de l'avion. Elles sont montées verticalement.

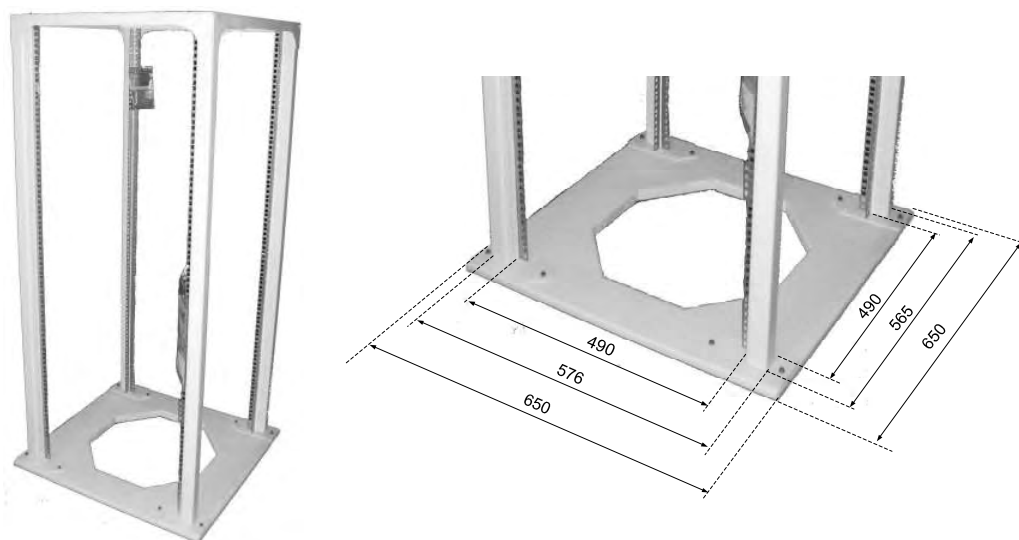


Figure 6. Baie ATR-42

L'avion

L'ATR 42 est un avion de recherche expérimental depuis le début de l'année 2006. C'est un avion ATR 42-320 modifié pour l'usage scientifique. Il est enregistré sous F-HMTO.

Dimensions :

Longueur : 22,67m
Hauteur : 7,59m
Envergure : 24.57m

Poids :

Vide : 11300kg
Max. décollage : 16900kg.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 16/65</p>
---	---	--

Performances en vol :

Vitesse de croisière : 100m/s (min. 70m/s et max. 134m/s)
Endurance : 6h maximum (dépend de passagers et fret)
L'autonomie à 4000m : 3000km
Altitude : 100m minimum au dessus de la mer&terre
Plafond : 25000feet (7500m)
Temps de montée pour 3000m : 8min
Temps de montée pour 6000m : 20min
Longueur de la piste d'aviation en conditions standards : 1200m minimum

Charge :

Charge max. : 4600kg
Charge scientifique (opération normale) : 2500kg

ATR42 autonomy

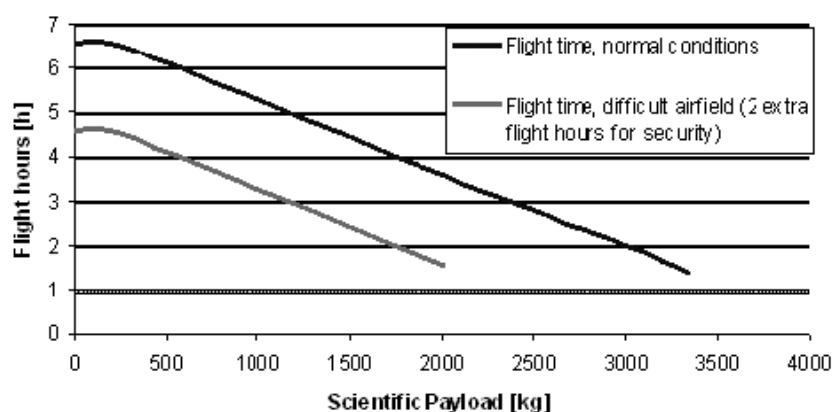


Figure 7. Graphe d'autonomie d'ATR42 en fonction de charge scientifique

Dimension de cabine :

Longueur : 11,56m ; largeur : 2,57m (2,26m au sol)
Hauteur : 1,53m

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLÈVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 17/65
---	---	--

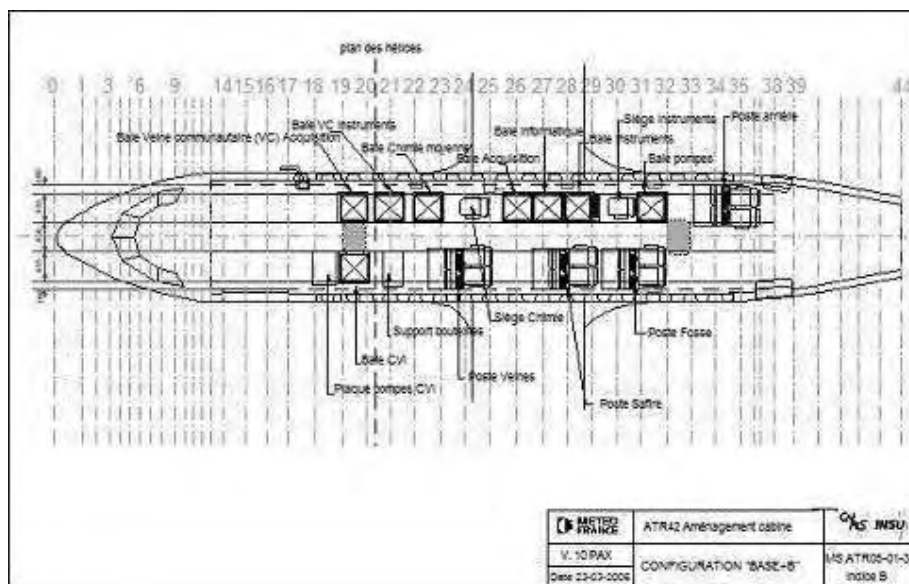


Figure 8. Plan de la cabine

Alimentation électrique :

Une baie d'alimentation électrique alimente tous les équipements scientifiques. Le générateur et alternateur de l'avion fournissent 28V DC et 115V AC à la baie. Elle est connectée à 5 différentes unités de distribution (D.U) dans la cabine et à une unité de jonction scientifique (B.J.S) pour alimenter les sondes externes. Une D.U. peut fournir 28V DC, 220V AC/50Hz, 115V AC/400Hz et 26V AC/400Hz.

La puissance électrique disponible est donc :

- 18kVA au sol avec alimentation externe
- 20kVA en vol
- 14kVA en mode hotel (Juste les générateurs fonctionnent, utile au sol si n'importe quelle alimentation externe est disponible).

Les contraintes sur la tenue structurale, la masse, les matériaux, les équipements dangereux, et l'électricité sont précisées en point 2-6 (page 3-8) du document « *Instructions pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués* » (DA-1).

La veine de l'avion pour le prélèvement et l'évacuation d'air

La prise d'air de l'échantillonnage pourrait se faire à l'un des deux endroits de l'avion (Entrée A et Entrée B). Nous préférons l'entrée A, parce que l'emplacement de cette entrée permet d'avoir une longueur du tuyau de prélèvement la plus courte. Mais dans les deux cas, il faudra construire la(les) pièce(s) permettant l'entrée d'air dans l'instrument. Il est également possible de mettre la baie près de porte cargo au coté gauche de l'avion. La décision sera prise avec SAFIRE tout en limitant la longueur du tuyau de prélèvement.

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 18/65
---	---	--

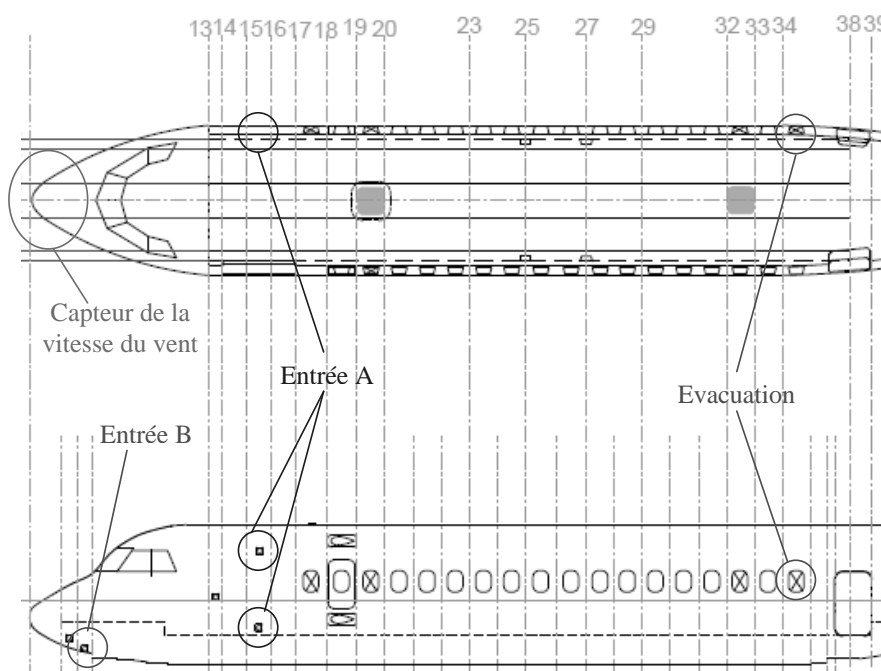


Figure 9. Vue de dessus et vue de droite



Figure 10. Emplacement de l'entrée A et B

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 19/65</p>
---	---	---

Dans le cas de l'entrée A :

Cette entrée se situe au coté droit et à 4295,5mm du nez de l'avion. La baie serait à proximité immédiate de cette entrée. Dans ce cas il est tout à fait possible d'installer d'autres tuyaux (diamètre et matériaux). L'inconvénient est le retard entre le nez de l'avion (l'endroit de la mesure de la vitesse du vent) et l'arrivée de l'air à l'entrée de cet inlet (4295,5mm). Mais ce retard peut être compensé lors du post-traitement. La distance entre l'entrée A et la sortie d'évacuation est de 10093,5mm.

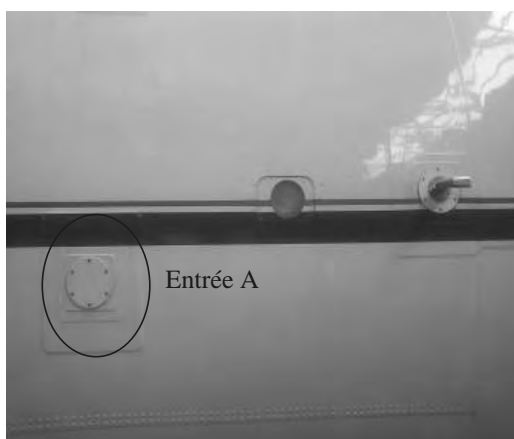


Figure 11. Emplacement de l'entrée A

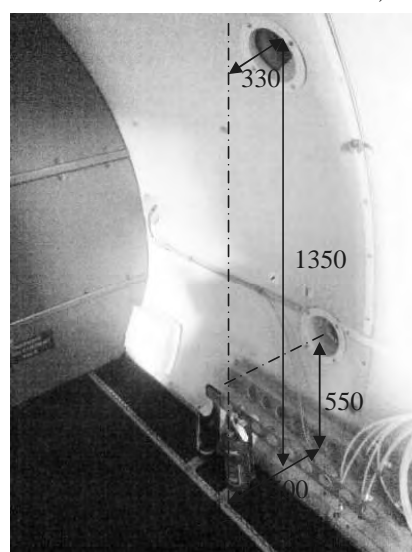


Figure 12. Emplacement de l'entée A dans la cabine

Le plan d'un exemple de raccord pour cette entrée est fourni par l'équipe SAFIRE. La pièce au milieu est interchangeable avec différents diamètres et différentes formes de sonde de prélèvement pour s'adapter au besoin.

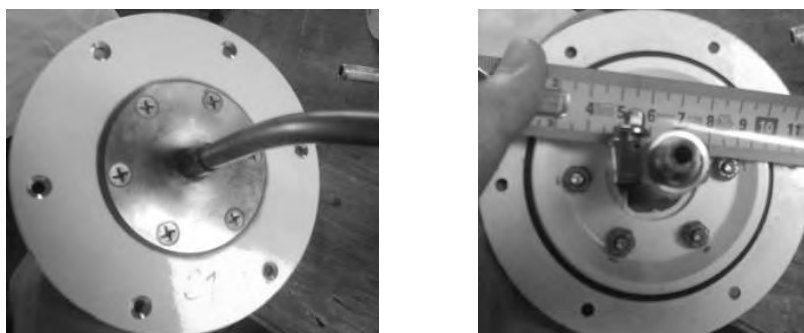


Figure 13. Raccord pour l'entrée A

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 20/65</p>
---	---	--

Dans le cas de l'entrée B :

La définition est contrainte par la forme du capteur déjà installé à cet endroit et il faudra adapter une sonde existante. Il n'est pas possible de modifier les sondes déjà installées car c'est une zone très sensible de l'avion (les capteurs utilisés pour les mesures destinées aux pilotes se trouvent dans cette zone). La pièce d'entrée d'air devra donc être soumise à ces contraintes. Nous pouvons éventuellement installer un tuyau dans une sonde actuelle. Les tuyaux iront ensuite du nez (zone avant) vers la cabine où devrait être installée la baie (à peu près au niveau de l'entrée B). Dans ce cas le tuyau de prélèvement sera plus long. Ces tuyaux n'ont jamais été testés et ils sont de diamètre 1/4 pouce extérieur (2 en téflon et 1 en inox).



Figure 14. Emplacement de l'entrée B

La veine d'évacuation :

La veine d'évacuation se situe à 14389 mm du nez et sur le coté droit de l'avion. Les tuyaux d'évacuation doivent suivre le cheminement sur le coté et près du sol de l'avion.

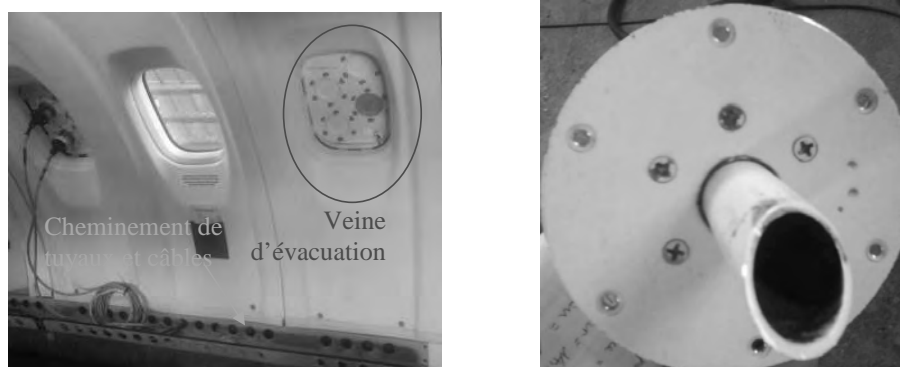


Figure 15. Emplacement de la veine d'évacuation et raccord associé

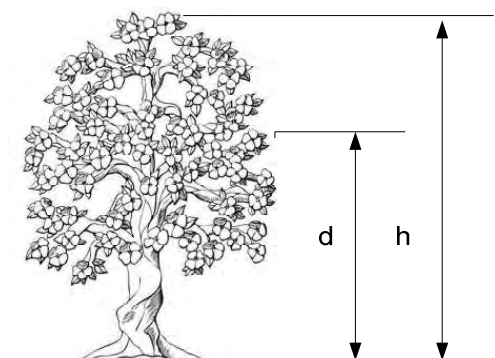
	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 21/65</p>
---	---	--

Echantillon d'air

C'est lui que l'on va analyser. La prise d'échantillon devra être réalisée au plus proche possible du capteur de vitesse de l'air. Mais pour la configuration avion on peut accepter un espacement plus important qu'au sol, compte tenu de la taille la plus importante des tourbillons.

L'échantillon d'air sera prélevé au dessus de sites du type végétations variées à une hauteur variable selon la hauteur moyenne des végétations, ou au dessus des villes où l'atmosphère doit être homogène.

La mesure sera effectuée à une hauteur supérieure à deux fois la hauteur de la végétation pour les campagnes au sol, de façon à ne pas se situer devant la sous couche rugueuse.



h est la hauteur de la végétation, et d est la hauteur de déplacement (surface fictive). La relation empirique entre d et h est $d \approx \frac{2}{3}h$ pour un couvert homogène de végétation. La hauteur de mesure doit suivre la règle suivante :

$$\Delta_{mesure} \geq 3d = 2h$$

Les utilisateurs

Les utilisateurs se caractérisent d'une manière précise pour chaque étape du cycle de vie.

➤ Tests des analyseurs

Personnes du laboratoire d'aérodynamique ou d'autres laboratoires

Maîtriser l'analyseur.

➤ Intégrer l'instrument

Personnes du laboratoire d'aérodynamique.

Maîtriser l'instrument et son système de fonctionnement.

Avoir des connaissances en mécanique, câblage électrique et vide primaire.

➤ Tests de l'instrument au sol

Personnes du laboratoire d'aérodynamique.

Maîtriser l'instrument et son système de fonctionnement (mécanique, électronique et informatique).

Avoir des connaissances en mécanique, vide, électronique, informatique et sur le principe de la

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 22/65</p>
---	---	--

mesure DEC.

➤ Campagnes de mesures

Personnes du laboratoire d'aérologie et (ou) d'autre laboratoire en fonction des missions.
 Le choix des campagnes, la définition de l'installation des sites sont à la charge des chercheurs.
 Savoir-faire dans l'installation de campagne de terrain en météorologie.
 Maîtriser l'installation de l'instrument et son système de fonctionnement.
 Respecter les règles de sécurité.

➤ Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42)

Personnes du laboratoire d'aérologie et de l'équipe SAFIRE.
 Maîtriser l'installation de l'instrument et son système de fonctionnement.

➤ Phase opérationnelle

Personnes du laboratoire d'aérologie ou non en fonction de la disponibilité de place dans l'avion
 L'équipe SAFIRE.
 L'utilisateur devra connaître le fonctionnement de l'instrument.

➤ Gestion des données

Personnes du laboratoire d'aérologie ou non.
 L'équipe SAFIRE ou non.
 Personnes des autres laboratoires ou non.
 La provenance d'utilisateurs est en fonction de caractéristiques de missions et d'équipes.
 L'utilisateur devra connaître la procédure de récupération des données de l'instrument.

➤ Maintenance

Personnes du laboratoire d'aérologie.
 Maîtriser la conception de l'instrument et son fonctionnement.

➤ Transports

Personnes du laboratoire d'aérologie ou sociétés de transport (Selon type de missions, campagnes de mesure).

➤ Stockage

Personnes du laboratoire d'aérologie ou d'autre laboratoire (si l'instrument est prêté aux autres laboratoires).
 L'opérateur doit maîtriser les conditions de stockage de l'instrument.

➤ Recyclage

Personnes du laboratoire d'aérologie.
 Connaître la réglementation en vigueur.

Environnement atmosphérique

Les conditions atmosphériques seront variées suivant les types de campagnes :

L'humidité : 40%-100%.

Température : 5°C-45°C (campagne de mesures d'été).

Pression : Fonctionnement au sol : Pression atmosphérique.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 23/65</p>
---	---	--

Fonctionnement en avion : $\approx 700\text{hpa}$ à l'extérieur et $\approx 950\text{hpa}$ à l'intérieur de l'avion.

Site(s) de tests & campagnes de mesures au sol

Lieu non sécurisé en général.

Seul les systèmes électroniques (PC, système d'acquisition, système de commande) seront abrités (un abri sécurisé sera prévu à cet effet).

Localisation géographique :

En France pour la phase de tests et validation de l'instrument.

Peut être dans le monde entier une fois l'instrument validé.

Au dessus des surfaces végétales et urbanisées.

Source(s) d'alimentation

Pour les campagnes avions :

Une baie d'alimentation électrique alimente tous les équipements scientifiques. Le générateur et alternateur de l'avion fournissent 28V DC et 115V AC à la baie. Elle est connectée à 5 différentes unités de distribution (D.U) dans la cabine et à une unité de jonction scientifique (B.J.S) pour alimenter les sondes externes. Une D.U. peut fournir 28V DC, 220V AC/50Hz, 115V AC/400Hz et 26V AC/400Hz.

La puissance électrique disponible est donc :

- 18kVA au sol avec alimentation externe.
- 20kVA en vol.
- 14kVA en mode hotel (Juste les générateurs fonctionnent, utile au sol si n'importe quelle alimentation externe est disponible).

La tension 220V AC/50Hz et 28V DC est préférable par l'équipe SAFIRE.

Pour les campagnes au sol :

A définir en fonction de campagnes de mesures. En cas de difficulté d'alimentation électrique (220V/50hz) des panneaux solaires, batteries, groupe électrogène ou autres sont envisageables.

Capteur de vitesse du vent

Pour le fonctionnement au sol, ce capteur sera un anémomètre sonique monodimensionnel pour la mesure de la vitesse verticale du vent, ou tridimensionnel pour la mesure des trois composantes du vent. Nous l'utiliserons pour mesurer la vitesse verticale du vent pour le fonctionnement au sol.

Pour le fonctionnement dans l'avion, ce capteur est intégré au nez de l'avion. Un post-traitement sera nécessaire pour obtenir la vitesse verticale du vent.

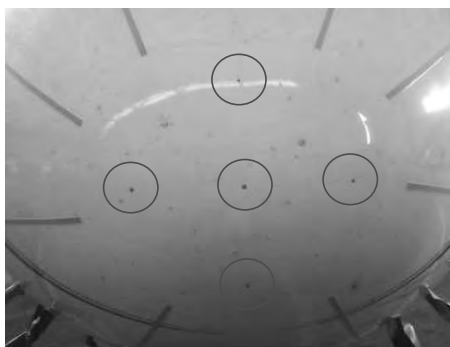


Figure 16. Capteur au nez de l'avion

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 24/65</p>
---	---	--

Moyen de transport

Il sera défini en fonction des types de missions, des lieux, de la taille et du poids de l'instrument.

Lieu(x) de stockage

L'instrument devra résister à différentes conditions atmosphérique durant ces phases de stockages.

Stockage au laboratoire :

Dans une pièce sécurisée, et chauffée en hiver.

Température : 15-35°C

Humidité : 20-80%

Pression : Patm (1 bar)

Stockage en cours d'utilisation (transport et stockage sur sites de mesures):

Température : 0-50°C

Humidité : 40-100%

Pression : 700hpa-1000hpa

Outils

Des outils de dimensions normalisées (normes UE) et courants (pincettes, tournevis plat ou cruciforme, clés plates, pipes, 6 pans, marteau, réglet, pied à coulisse) seront utilisés pour l'intégration, la mise en service et l'entretien de l'instrument.

Produits d'entretien

Des produits d'entretien seront utilisés tout au long de la vie de l'instrument.

Ils seront définis en fonction de la conception de l'instrument.

6. EXPRESSION FONCTIONNELLE DU BESOIN

6.1. Fonctions de service et contraintes

Une fonction est une action d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées uniquement en terme de finalité. Elle est formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un ou plusieurs compléments.

On exprimera pour toutes les différentes étapes du cycle de vie des fonctions de service principales (FP), des fonctions de service complémentaires (FC) et des contraintes (C).

6.1.1. Test d'analyseur

FP1.1 : Permettre d'intégrer dans les fonctions de l'instrument les paramètres liés aux différents analyseurs (temps d'analyse, débit d'analyse, volume d'échantillon d'air, etc.)

6.1.2. Intégrer le système de prélèvement d'échantillon d'air

FP2.1 : Etre assemblé facilement au moyen d'outils.

FP2.2 : Etre monté facilement dans la baie ATR-42.

FP2.3 : Etre raccordé facilement aux différents analyseurs.

FP2.4 : Permettre le raccordement au système de commande électronique et d'acquisition des données.

C2.1 : Ne doit pas dépasser la baie.

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 25/65
---	---	--

6.1.3. Test de l'instrument au sol

- FP3.1 : Permettre d'être installé facilement et correctement sur les sites de tests.
 FP3.2 : Permettre de prélever les échantillons d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.
 FP3.3 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.
 FP3.4 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.
 FP3.5 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un cycle d'analyse.
 FP3.6 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.
 FP3.7 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de fonctionnement de l'instrument.
 FP3.8 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de fonctionnement à travers des signaux acquis par le système d'acquisition.
 FP3.9 : Etre capable de régler et calibrer différents paramètres liés au fonctionnement de l'instrument.
 FP3.10 : Etre capable de valider le bon fonctionnement de l'instrument.
 FC3.1 : Etre représentatif du fonctionnement de l'instrument dans l'avion ATR-42.
 FC3.2 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.
 FC3.3 : S'adapter aux sources d'alimentation.
 FC3.4 : Résister à l'environnement.
 FC3.5 : Ne pas nuire à l'environnement.
 C3.1 : Rapidité de mise en œuvre du système.
 C3.2 : Garantir le bon fonctionnement de l'analyseur.
 C3.3 : La prise d'échantillon devra être plus proche possible du capteur de vitesse de l'air.
 C3.4 : Synchronisation de la mesure de la vitesse du vent avec la capture d'échantillon d'air.
 C3.5 : L'étanchéité de tout le système.

6.1.4. Campagnes de mesures au sol (phase opérationnelle)

- FP4.1 : Permettre d'être installé facilement et correctement sur les sites choisis par l'utilisateur.
 FP4.2 : Doit pouvoir fonctionner de manière automatique et continue pendant plusieurs semaines.
 FP4.3 : Permettre de fixer les paramètres appropriés pour la campagne de mesure.
 FP4.4 : Permettre de prélever les échantillons d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.
 FP4.5 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.
 FP4.6 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.
 FP4.7 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un cycle d'analyse.
 FP4.8 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.
 FP4.9 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de fonctionnement de l'instrument.
 FP4.10 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de bon fonctionnement de l'instrument.
 FC4.1 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.
 FC4.2 : S'adapter aux sources d'alimentation.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 26/65</p>
---	---	--

FC4.3 : Résister à l'environnement.

FC4.4 : Doit pouvoir subir des interruptions pour maintenance.

FC4.5 : Ne pas nuire à l'environnement.

C4.1 : Rapidité de mise en œuvre du système.

C4.2 : Garantir le bon fonctionnement de l'analyseur.

C4.3 : La prise d'échantillon devra être plus proche possible du capteur de vitesse de l'air.

C4.4 : Synchronisation de la mesure de la vitesse du vent avec la capture d'échantillon d'air.

C4.5 : L'étanchéité de tout le système.

6.1.5. Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42)

FP5.1 : Etre installé facilement et correctement dans la baie ATR-42 au moyen d'outils.

FP5.2 : Etre installé facilement (la baie ATR-42) et correctement dans l'avion.

FP5.3 : Etre raccordé facilement et correctement à la veine de prélèvement de l'avion.

FP5.4 : Etre raccordé facilement et correctement à l'analyseur par l'utilisateur.

FP5.5 : Etre raccordé facilement et correctement à une veine de l'avion pour l'évacuation des échantillons d'air après analyse.

FP5.6 : Permettre de régler et d'ajuster la synchronisation de la mesure de vent de l'avion avec notre système.

FP5.7 : Etre capable de régler et calibrer différents paramètres liés au fonctionnement de l'instrument à bord de l'avion.

FP5.8 : Permettre la validation du fonctionnement de l'instrument à bord de l'avion.

FC5.1 : Se raccorder aux sources d'alimentation.

FC5.2 : Respecter les instructions pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués dans les avions SAFIRE.

C5.1 : Respecter des normes de sécurité de l'ATR-42.

C5.2 : La prise d'échantillon devra être la plus proche possible du capteur de vitesse de l'air.

C5.3 : Garantir le bon fonctionnement de l'analyseur.

C5.4 : Rapidité de mise en œuvre du système.

6.1.6. Phases de décollage/Atterrissage de l'avion

FC6.1 : Résister à l'environnement, vibrations, accélérations et chocs.

6.1.7. Campagnes de mesures dans l'avion ATR-42 (phase opérationnelle).

FP7.1 : Doit pouvoir fonctionner de manière automatique et continue pendant 5 heures.

FP7.2 : Permettre de fixer les paramètres appropriés pour la campagne de mesure.

FP7.3 : Permettre de prélever les échantillons d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.

FP7.4 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.

FP7.5 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.

FP7.6 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un cycle d'analyse.

FP7.7 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.

FP7.8 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 27/65</p>
---	---	--

fonctionnement de l'instrument.

FP7.9 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de bon fonctionnement de l'instrument.

FC7.1 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.

FC7.2 : S'adapter aux sources d'alimentation.

FC7.3 : Résister à l'environnement.

FC7.4 : Ne pas nuire à l'environnement.

C7.1 : Rapidité de mise en œuvre du système.

C7.2 : Garantir le bon fonctionnement de l'analyseur.

C7.3 : La prise d'échantillon devra être la plus proche possible du capteur de vitesse de l'air.

C7.4 : Synchronisation de la mesure de la vitesse du vent avec la capture d'échantillon d'air.

C7.5 : L'étanchéité de tout le système.

C7.6 : Respecter des normes de sécurité de l'ATR-42.

6.1.8. Gestion des données

FP8.1 : Permettre de rapatrier les données en cours de mesures et à la fin des campagnes.

6.1.9. Maintenance

FP9.1 : Permettre à l'utilisateur de remplacer les pièces d'usure au moyen d'outils.

FC9.1 : Résister aux produits d'entretien.

6.1.10. Transports

FP10.1 : Permettre d'être transporté facilement vers les lieux des différentes campagnes de mesures (sol ou avion) par l'utilisateur ou un transporteur.

FC10.1 : Résister au transport.

6.1.11. Stockage

FP11.1 : Permettre d'être stocké dans un lieu de stockage.

FC11.1 : Résister à l'environnement.

6.1.12. Recyclage

FP12.1 : Être démonté par l'opérateur à l'aide d'outils.

FC12.1 : Respecter l'environnement.

FC12.2 : Être dépollué facilement par l'opérateur.

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 28/65
---	---	---

6.2. Critères d'appréciation et les niveaux des critères d'appréciation

Position sur l'échelle de mesure d'un critère d'appréciation d'une fonction.

Flexibilité : Ensemble d'indications donné par le demandeur quant à la possibilité d'adapter le niveau visé pour un critère d'appréciation. Cette flexibilité peut s'exprimer de façon qualitative (classe de flexibilité) ou quantitative.

Quatre classes de flexibilité sont définies :

- F0 flexibilité nulle, niveau impératif
- F1 flexibilité faible, niveau peu négociable
- F2 flexibilité bonne, niveau négociable
- F3 flexibilité forte, niveau très négociable

6.2.1. Test d'analyseur

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP1.1 : Permettre d'intégrer dans les fonctions de l'instrument les paramètres liés aux différents analyseurs (temps d'analyse, débit d'analyse, volume d'échantillon, etc.)		
Déterminer le temps d'analyse en fonction des analyseurs	Réglé via le réglage d'1 à 60s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Pouvoir garantir un certain volume d'air pour l'analyse	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des analyseurs	2
Pouvoir garantir un certain débit à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4L/min à 0,5 L/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar	1

6.2.2. Intégrer le système de prélèvement d'échantillon d'air

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP2.1 : Etre assemblé facilement au moyen d'outils.		
Conception de l'instrument simplifié au maximum	Minimum de pièces Eviter les collages et les pièces emmanchées en force Utilisation d'outils standards	3
Fournir une notice d'assemblage	Notice détaillée avec nomenclature de toutes les pièces et câblages de l'instrument, et procédure d'intégration Plans mécaniques et électriques et schéma de câblage	0
FP2.2 : Etre monté facilement dans la baie ATR-42		

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 29/65
---	---	---

Fixation adaptée à la baie de 19 pouces	Interface mécanique pour baie 19 pouces	0
Facilité de montage/démontage	Montage/démontage par la « face avant » de la baie	1
Adaptation à la forme géométrique de la baie	Ne pas dépasser le volume de la baie	0
FP2.3 : Etre raccordé facilement à l'analyseur.		
Le système de connexion ne doit pas polluer les échantillons d'air	Matériaux (en contact avec les échantillons) inertes aux COV et COVO	0
Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau x m en fonction des analyseurs déportés Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
Raccords adaptés aux différents analyseurs	Raccord inox 316 droit passage paroi à serrage 1/4" ou 6 mm Raccords étanches	2
FP2.4 : Permettre le raccordement au système de commande électronique et d'acquisition des données.		
Câbles adaptés	Câbles qualifiés pour l'avion	0
Standardisation du raccordement	Connecteurs standards qualifiés pour l'avion	2

6.2.3. Test de l'instrument au sol

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP3.1 : Permettre d'être installé facilement et correctement sur les sites de tests.		
Pouvoir être transporté	Minimum 2 poignées de transport si l'instrument est < ou = 50 kg et minimum 4 si l'instrument est > 50 Kg	2
Poids	30 kg max	2
FP3.2 : Permettre de prélever les échantillons d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.		
Temps de prélèvement	< 0,2 s	0
Pression des échantillons d'air dans l'enceinte après le prélèvement	Entre 95 % P _{atm} et 105 % P _{atm} en restant plus proche possible de P _{atm}	1
Longueur de tuyau de prélèvement	Longueur de tuyau < 1m	1
Cadence de prélèvement des échantillons d'air	Réglage d'1 à 60s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Volume d'air prélevé	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des analyseurs	2
FP3.3 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.		
Adaptation aux raccordements d'analyseur	Raccord inox 316 droit passage paroi à serrage 1/4" ou 6 mm Raccords étanches	3

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 30/65
---	---	--

Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau x m en fonction des analyseurs déportés Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	1
Pression d'échantillons d'air à l'entrée de l'analyseur	Pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	0
Débit de transmission à l'entrée de l'analyseur	Réglable de 4 l/min à 0,5 l/min en fonction des analyseurs	1
FP3.4 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.		
Pouvoir garantir en continue un certain débit d'échantillons à analyser à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4l/min à 0,5 l/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	1
FP3.5 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un cycle d'analyse.		
Temps de vidange	< 10 s en fonction du volume restant dans le réservoir de prélèvement et les tuyaux	2
Evacuation de l'air analysé (à la sortie de l'analyseur) et l'air restant (dans le réservoir de prélèvement et tuyaux).	En atmosphère	0
Niveau du vide	< 40 mbar dans le réservoir du prélèvement	0
FP3.6 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.		
Signal de démarrage	Déclenché par utilisateur	0
Commande du prélèvement des échantillons, de la transmission des échantillons à l'analyseur, de l'analyse, et de la vidange	Réglable Automatique et cyclique	0
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et tuyaux)	0
FP3.7 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de fonctionnement de l'instrument.		
Pouvoir transmettre le moment de la capture d'échantillon (ouverture et fermeture)	En continu avec une précision de +/- 20 ms	1
Pouvoir transmettre le niveau de la pression à l'entrée de l'analyseur	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le niveau de la pression dans le réservoir de prélèvement	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 31/65
---	---	---

Pouvoir transmettre le moment du début et de la fin de l'analyse de chaque cycle	En continu avec une précision de +/- 0,5 s	2
Pouvoir extraire ou regarder des données en cours d'analyse	En continu	2
Durée d'enregistrement	En continu pendant plusieurs semaines	3
FP3.8 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de fonctionnement à travers des signaux acquis par le système d'acquisition.		
Visualisation de contrôle	Interface utilisateur type « labview » avec voyants et indicateurs de la manip. En temps réel avec un retard inférieur à 100ms	2
Type de control au cas d'un dysfonctionnement	Arrêt du fonctionnement de l'instrument tout de suite (< 1 s)	0
FP3.9 : Etre capable de régler et calibrer différents paramètres liés au fonctionnement de l'instrument.		
Accessibilité aux réglages de l'instrument	Sans démonter l'instrument	2
Fournir une notice de réglage	Notice détaillée avec procédure de réglage. Illustrer avec plans mécaniques et électriques et schéma de câblage Accessible aux débutants en mécanique	0
Nombre outils nécessaires	Minimum possible	3
FP3.10 : Etre capable de valider le bon fonctionnement de l'instrument.		
Pouvoir transmettre le moment de la capture d'échantillon et le temps de capture	En continu avec une précision de +/- 20 ms	1
Pouvoir transmettre le niveau de la pression à l'entrée de l'analyseur	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le niveau de la pression dans le réservoir de prélèvement	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le moment du début et de la fin de l'analyse de chaque cycle	En continu avec une précision de +/- 0,5 s	2
Durée de validation	En continu pendant plusieurs semaines	3
FC3.1 : Etre représentatif du fonctionnement de l'instrument dans l'avion ATR-42.		
Pouvoir être testé avec le tuyau de prélèvement de l'avion (différents diamètres et longueurs)	Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur Longueur de tuyau 1 m minimum	2
Pouvoir être testé dans la baie ATR 42	Installation sans dépassement du volume de la baie	2
Pouvoir être testé sous la même condition d'alimentation de l'avion ATR-42	220V/50Hz AC et 28V DC	2
FC3.2 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.		
Ne pas absorber les éléments à analyser. Ne pas rejeter des composants dans l'échantillon.	Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0
Etanchéité du réservoir	Aucune fuite	0
FC3.3 : S'adapter aux sources d'alimentation.		
Type d'alimentation	Référencer à l'alimentation d'avion (28V DC)	2

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 32/65
---	---	--

	et 220V/50Hz)	
Consommation électrique	Minimum possible	3
FC3.4 : Résister à l'environnement.		
Résister à la température pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	5-45°C	2
Résister à la corrosion pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	Matériaux résistant à l'air Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0
Résister à l'humidité pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	40-100%	2
Résister à la pluie pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	Composants électroniques en abri. Pas de corrosion sur l'instrument. Système étanche	0
FC3.5 : Ne pas nuire à l'environnement.		
Rejet de matière polluante	Aucune	0

6.2.4. Campagnes de mesures aux sols (phase opérationnelle)

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP4.1 : Permettre d'être installé facilement et correctement sur les sites choisis.		
Prise des échantillons d'air	Plus proche possible du capteur de vent (< 1m) Supérieure à 2 fois la hauteur de la végétation	0
Pouvoir être transporté	Minimum 2 poignées de transport si l'instrument est < ou = 50 kg et minimum 4 si l'instrument est > 50 Kg	2
Poids	30 kg max	2
FP4.2 : Doit pouvoir fonctionner de manière automatique et continue pendant plusieurs semaines.		
Signal de démarrage	Déclenché par utilisateur	0
Commande du prélèvement des échantillons, de la transmission d'échantillon à l'analyseur, de l'analyse, et de la vidange	Réglable Automatique et cyclique	0
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et la tuyauterie)	0
Résister à l'environnement pendant le fonctionnement (plusieurs semaines)	Résister à température 5-45°C Résister à l'humidité 40-100% Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO. Composants électroniques en abri.	2

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 33/65
---	---	---

	Pas de corrosion sur l'instrument. Système étanche	
FP4.3 : Permettre de fixer les paramètres appropriés pour la campagne de mesures.		
Pouvoir fixer le temps de prélèvement entre deux échantillons	Réglage d'1 à 60 s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Pouvoir garantir un certain volume d'air pour l'analyse	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des analyseurs	2
Pouvoir garantir un certain débit à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4 L/min à 0,5 L/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar	1
Assurer un temps de vidange	< 10 s en fonction du volume restant dans le réservoir de prélèvement et les tuyaux	2
Accessibilité aux réglages	Sans démonter l'instrument	2
FP4.4 : Permettre de prélever d'échantillon d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.		
Temps de prélèvement	< 0,2 s	0
Pression des échantillons d'air dans l'enceinte après le prélèvement	Entre 95 % P_{atm} et 105 % P_{atm} en restant plus proche possible de P_{atm}	1
Longueur de tuyau de prélèvement	Longueur de tuyau < 1 m	1
Cadence de prélèvement des échantillons d'air	Réglage d'1 à 60 s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Volume d'air prélevé	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des analyseurs	2
FP4.5 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.		
Adaptation aux raccordements d'analyseur	Raccord inox 316 droit passage paroi à serrage $\frac{1}{4}$ " ou 6 mm Raccords étanches	3
Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau x m en fonction des analyseurs déportés Diamètres de tuyau $\frac{1}{4}$ " ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
Pression d'échantillons d'air à l'entrée de l'analyseur	Pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	0
Débit de transmission à l'entrée de l'analyseur	Réglable de 4 l/min à 0,5 l/min en fonction des analyseurs	1
FP4.6 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.		
Pouvoir garantir en continue un certain débit d'échantillons à analyser (ou d'air) à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4 L/min à 0,5 L/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	1
FP4.7 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un		

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 34/65
---	---	---

cycle d'analyse.		
Temps de vidange	< 10 s en fonction du volume restant dans le réservoir de prélèvement et les tuyaux	2
Evacuation de l'air analysé (à la sortie de l'analyseur) et l'air restant (dans le réservoir de prélèvement et tuyaux).	En atmosphère	0
Niveau du vide	< 40 mbar dans le réservoir du prélèvement	0
FP4.8 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.		
Signal de démarrage	Déclenché par utilisateur	0
Commande du prélèvement des échantillons, de la transmission d'échantillon à l'analyseur, de l'analyse, et de la vidange	Réglable Automatique et cyclique	0
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et la tuyauterie)	0
FP4.9 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de fonctionnement de l'instrument.		
Pouvoir transmettre le moment de la capture d'échantillon (ouverture et fermeture)	En continu avec une précision de +/- 20 ms	1
Pouvoir transmettre le niveau de la pression à l'entrée de l'analyseur	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le niveau de la pression dans le réservoir de prélèvement	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le moment du début et de la fin de l'analyse de chaque cycle	En continu avec une précision de +/- 0,5 s	2
Pouvoir extraire ou regarder des données en cours d'analyse	En continu avec un temps de retard < 100 ms	2
Durée d'enregistrement	En continu pendant plusieurs semaines	3
FP4.10 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de fonctionnement à travers des signaux acquis par le système d'acquisition.		
Visualisation de contrôle	Interface utilisateur type « labview » avec voyants et indicateurs de fonctionnement. En temps réel avec un retard inférieur à 100ms	2
Type de contrôle au cas d'un dysfonctionnement	Arrêt du fonctionnement de l'instrument tout de suite (< 1 s)	0
FC4.1 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.		
Ne pas absorber les éléments à analyser. Ne pas rejeter des composants dans l'échantillon.	Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 35/65
---	---	--

Étanchéité du réservoir	Aucune fuite	0
FC4.2 : S'adapter aux sources d'alimentation.		
Type d'alimentation	Référencer à l'alimentation d'avion (28V DC et 220V/50Hz)	2
Consommation électrique	Minimum possible	3
FC4.3 : Résister à l'environnement.		
Résister à la température pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	5 - 45°C	2
Résister à la corrosion pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	Matériaux résistant à l'air Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0
Résister à l'humidité pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	40 - 100 %	2
Résister à la pluie pendant l'utilisation (plusieurs semaines)	Composants électroniques en abri. Pas de corrosion sur l'instrument. Système étanche	0
FC4.4 : Doit pouvoir subir des interruptions pour maintenance		
Temps d'interruption	Quelques heures à quelques jours en fonction du climat et des campagnes de mesures.	3
Fréquence d'interruption	0 à quelques fois durant la mesure en fonction du climat et des campagnes de mesures	3
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et la tuyauterie)	0
FC4.5 : Ne pas nuire à l'environnement.		
Rejet de matière polluante	Aucune	0

6.2.5. Intégration et tests de l'instrument dans l'avion (ATR-42)

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP5.1 : Etre installé facilement et correctement dans la baie au moyen d'outils.		
Fixation adaptée à la baie de 19 pouces	Interface mécanique pour baie 19 pouces	0
Facilité de montage/démontage	Montage/démontage par la « face avant » de la baie	1
Adaptation à la forme géométrique de la baie	Ne pas dépasser le volume de la baie	0
FP5.2 : Etre installé facilement et correctement dans l'avion.		
Masse admissible par baie (masse de la baie incluse)	Maximum 141 kg (baie = 21 kg)	0
Taille de l'instrument	Ne dépasse pas le volume de la baie	0
S'adapter aux rails	Masse max. linéaire admissible par paire de rail : 232 kg/m	0

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 36/65
---	---	--

	Efforts max. admissibles en tout point d'un rail : $F_{\text{avant}} < 12080 \text{ N}$, $F_{\text{latérale}} < 6190 \text{ N}$, $F_{\text{haut}} < 14600 \text{ N}$	
FP5.3 : Etre raccordé facilement et correctement à la veine de prélèvement de l'avion.		
Le système de connexion ne doit pas polluer l'échantillon d'air	Matériaux (en contact avec les échantillons) inertes aux COV et COVO	0
Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau 1 m minimum en fonction de l'entrée d'air ATR42 et de la position du système de prélèvement dans la baie. Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
FP5.4 : Etre raccordé facilement et correctement à l'analyseur par l'utilisateur.		
Le système de connexion ne doit pas polluer les échantillons d'air	Matériaux (en contact avec les échantillons) inertes aux COV et COVO	0
Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau x m en fonction des analyseurs déportés Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
Raccords adaptés aux différents analyseurs	Raccord inox 316 droit passage paroi à serrage 1/4" ou 6 mm Raccords étanches	0
FP5.5 : Etre raccordé facilement et correctement à une veine de l'avion pour l'évacuation des échantillons d'air après analyse.		
Tuyaux adaptés (pour la vidange du système de prélèvement et pour la sortie de l'analyseur)	Matériaux inertes à l'ozone Longueur de tuyau 12 m minimum Diamètres de tuyau 1/4" ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
FP5.6 : Permettre de régler et ajuster la synchronisation de la mesure de vent de l'avion avec notre système.		
Pouvoir retrouver la mesure de vent de l'avion au moment de chaque capture de l'échantillon	Précision entre le moment de mesure et capture < 20 ms avec une résolution < 25 ms	0
Accessibilité aux réglages	Sans démonter l'instrument	2
FP5.7 : Etre capable de régler et calibrer différents paramètres liés au fonctionnement de l'instrument à bord de l'avion		
Accessibilité aux réglages de l'instrument	Sans démonter l'instrument	2
Fournir notice de réglage et calibrage	Notice détaillée avec procédure de réglage et calibrage. Illustrer avec plans mécaniques et électriques et schéma de câblage Accessible aux débutants en mécanique	0
Nombre outils nécessaires	Minimum possible	3
FP5.8 : Permettre la validation du fonctionnement de l'instrument à bord de l'avion.		
Pouvoir transmettre le moment de la	En continu avec une précision de +/- 20 ms	1

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 37/65
---	---	---

capture d'échantillon (ouverture et fermeture)		
Pouvoir transmettre le niveau de la pression à l'entrée de l'analyseur	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le niveau de la pression dans le réservoir de prélèvement	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le moment du début et de la fin de l'analyse de chaque cycle	En continu avec une précision de +/- 0,5 s	2
Durée de validation	En continu 5h minimum	1
FC5.1 : Se raccorder aux sources d'alimentation.		
Adaptation aux sources d'alimentation d'avion	28V DC (ou légèrement inférieur) et 220V/50Hz AC	2
Raccordement	Respecter la norme AIR 7822 (disponible sur demande à SAFIRE)	0
FC5.2 : Respecter les instructions pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués dans les avions SAFIRE.		
Le matériau de l'instrument	Métaux légers prioritaires (alu). Ou acier. Matériaux ininflammables, ne dégageant pas de fumées toxiques. (Matériaux non autorisés : PVC, PE, Polyester, Nylon, Polypropylène, Polyuréthane Matériaux autorisés : Téflon (PTFE, TFE, PFA, FEP), Silicone, Caoutchouc (NR isoprène), Hypalon, Néoprène)	1
Taille de l'instrument	Ne pas dépasser le volume de la baie	0
Poids de l'instrument (hors baie)	Maximum 120 kg	0
Accélération devant pouvoir être supportées par tous les matériels embarqués en cabine. (par rapport à l'axe longitudinal de l'avion)	Haut (6,5g), Bas (6g), Avant (9g), Arrière (1,5g), Latérales (3g)	0
Coefficient de sécurité de conception	>1,33 pour les pièces démontables >1,5 à la limite à la rupture du matériau	2
Sonde extérieure	Supporter F _{aéro} à une vitesse de vent 160 m/s. Envisager maximum la possible formation de givre et les conséquences.	0
Résister à la pressurisation de l'avion ATR 42 pour des équipements qui ont à subir ces charges de pressurisation	Différentiels de pression minimaux devant pouvoir être supportés : 13 psi	0
Fournir notice de montage/démontage si l'instrument n'est pas préinstallé dans une baie SAFIRE.	Notice détaillée avec nomenclature de toutes les pièces et câblages de l'instrument, et procédure d'intégration Plans mécaniques et électriques et schéma de câblage	2
S'adapter à la contrainte sur la masse de l'instrument	Instrument le plus léger possible. Nécessaire de pouvoir déterminer la masse de chaque équipement.	3

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 38/65
---	---	---

Structure d'assemblage	Structure visée ou rivetée ou soudure	2
Visserie	Qualité aéronautique (Standard NAS, AN, ou MS). Avoir un freinage de la visserie.	0
Respecter l'aménagement cabine	Sans angles vifs. Pas d'objets de masse conséquente non immobilisés. Avoir de la protection pour les équipements fragiles.	0
Tuyaux de circuits d'air	Résister à au moins 2 fois la P_{max} de service du circuit	0
Avoir des électrovannes/vannes d'isolation pour les prises d'air de grand diamètre (>1/2") permettant d'isoler à tout moment la cabine de l'extérieur en cas de problème sur la ligne de prélèvement ou d'évacuation de l'air.	Au repos, sans alimentation électrique, les vannes doivent être en position d'isolation.	0
Maitriser l'utilisation du gaz (bouteille, tampons, ou générés par les instruments)	Non toxique pour les personnes, non corrosif pour la structure avion, et non inflammable. Système de contrôle de la concentration des gaz est obligatoire s'ils sont inflammables et/ou toxiques. Minimiser la dangerosité et l'occurrence des risques éventuels. Minimiser le volume de gaz utilisé pour la durée d'un vol.	3
Récipient sous pression	Chaque bouteille sous pression doit être fabriquée et certifiée comme étant sans danger avant utilisation (testée par le constructeur à 1,5 fois la pression de service maximale). Les épreuves de bouteilles doivent avoir été réalisées moins de cinq ans avant les vols pour être montées dans l'avion.	0
Température élevée (>50°C)	Protection appropriée est nécessaire pour le personnel et pour diminuer les risques de départ de feu.	0
Câbles et connecteurs	Respecter les normes AIR 7822, ASNE0052, ASNE0053 ou MS (disponible sur demande à SAFIRE).	0
Protection électrique	Avoir fusible ou breaker aux normes aéronautiques correctement dimensionné à chaque ligne d'alimentation. Equiper d'interrupteurs sur chaque ligne d'alimentation.	1
Hautes tensions	Rendre les hautes tensions non accessibles et blinder ces alimentations en utilisation normale	0

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 39/65
---	---	--

Compatibilité électromagnétique	Réduire au maximum les EMI	3
---------------------------------	----------------------------	---

6.2.6. Phases de décollage/Atterrissage de l'avion

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FC6.1 : Résister à l'environnement, vibration, accélération et chocs		
Résister à la vibration et aux chocs	Avoir un système d'amortissement pour les composants sensibles et fragiles	3
Accélération devant pouvoir être supportée par tous les matériels embarqués en cabine. (par rapport à l'axe longitudinal de l'avion)	Haut (6,5g), Bas (6g), Avant (9g), Arrière (1,5g), Latérales (3g)	0

6.2.7. Campagnes de mesures dans l'avion ATR-42 (phase opérationnelle).

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP7.1 : Doit pouvoir fonctionner de manière automatique et continue pendant 5 heures.		
Signal de démarrage	Déclenché par utilisateur	0
Commande du prélèvement des échantillons, de la transmission d'échantillon à l'analyseur, de l'analyse, et de la vidange	Réglable Automatique et cyclique	0
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et la tuyauterie)	0
Résister à l'environnement pendant le fonctionnement (5 heures)	Résister à température 5 - 45°C Résister à l'humidité 40 – 100 % Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO. Avoir un système d'amortissement si l'instrument est sensible à la vibration.	2
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
FP7.2 : Permettre de fixer les paramètres appropriés pour la campagne de mesures.		
Pouvoir fixer le temps de prélèvement entre deux échantillons	Réglage d'1 à 60s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Pouvoir garantir un certain volume d'air pour l'analyse	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des	2

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 40/65
---	---	---

	analyseurs	
Pouvoir garantir un certain débit à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4 L/min à 0,5 L/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar	1
Assurer un temps de vidange	< 10 s en fonction du volume restant dans le réservoir de prélèvement et les tuyaux	2
Accessibilité aux réglages	Sans démonter l'instrument	2
FP7.3 : Permettre de prélever d'échantillon d'air rapidement en fonction des différents analyseurs.		
Temps de prélèvement	< 0,2 s	0
Pression des échantillons d'air dans l'enceinte après le prélèvement	Entre 95 % P_{atm} et 105 % P_{atm} en restant plus proche possible de P_{atm}	1
Longueur de tuyau de prélèvement	Longueur de tuyau 1 m minimum en fonction de l'entrée d'air ATR42 et de la position du système de prélèvement dans la baie.	1
Cadence de prélèvement des échantillons d'air	Réglage d'1 à 60 s au pas de 1 s à +/- 0,05 s pour le prélèvement des échantillons d'air	1
Volume d'air prélevé	Volume de prélèvement d'air fixe de 1 litre ou réglable de 0,2 à 1 litre en fonction des analyseurs	2
FP7.4 : Permettre la transmission de l'échantillon d'air à l'analyseur.		
Adaptation aux raccordements d'analyseur	Raccord inox 316 droit passage paroi à serrage $\frac{1}{4}$ " ou 6 mm Raccords étanches	3
Tuyaux adaptés	Matériaux inertes aux COV et COVO Longueur de tuyau x m en fonction des analyseurs déportés Diamètres de tuyau $\frac{1}{4}$ " ou 6 mm extérieur et 4,8 mm ou 4 mm à l'intérieur	2
Pression d'échantillons d'air à l'entrée de l'analyseur	Pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	0
Débit de transmission à l'entrée de l'analyseur	Réglable de 4 l/min à 0,5 l/min en fonction des analyseurs	1
FP7.5 : Permettre aux différents analyseurs d'analyser correctement les composés ciblés.		
Pouvoir garantir en continue un certain débit d'échantillons à analyser (ou d'air) à l'entrée de l'analyseur en gardant une pression constante à P_{atm}	Débit réglable de 4 L/min à 0,5 L/min en garantissant une pression atmosphérique constante à l'entrée de l'analyseur à +/- 50 mbar en fonction des analyseurs	1
FP7.6 : Permettre de vider l'air analysé et l'air restant rapidement et correctement à la fin d'un cycle d'analyse.		
Temps de vidange	< 10 s en fonction du volume restant dans le réservoir de prélèvement et les tuyaux	2
Evacuation de l'air analysé (à la sortie de l'analyseur) et l'air restant (dans le	En atmosphère à l'extérieur de l'avion	0

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 41/65
---	---	--

réservoir de prélèvement et tuyaux).		
Niveau du vide	< 40 mbar dans le réservoir de prélèvement	0
FP7.7 : Permettre d'être commandé cycliquement et automatiquement par le système électronique de commande.		
Signal de démarrage	Déclenché par utilisateur	0
Commande du prélèvement des échantillons, de la transmission d'échantillon à l'analyseur, de l'analyse, et de la vidange	Réglable Automatique et cyclique	0
Signal d'arrêt	Déclenché par utilisateur	0
Pouvoir être arrêté en sécurité	Avoir un arrêt d'urgence sans perte des données précédemment acquises. L'instrument doit obligatoirement se mettre en état repos après le signal d'arrêt. (Remise à pression atmosphérique dans le(s) réservoir(s) de prélèvement et la tuyauterie)	0
FP7.8 : Permettre au système d'acquisition d'enregistrer les différentes données et l'état de fonctionnement de l'instrument.		
Pouvoir transmettre le moment de la capture d'échantillon (ouverture et fermeture)	En continu avec une précision de +/- 20 ms	1
Pouvoir transmettre le niveau de la pression à l'entrée de l'analyseur	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le niveau de la pression dans le réservoir de prélèvement	En continu avec une précision de +/- 5 mbar et un temps de retard < 100 ms	2
Pouvoir transmettre le moment du début et de la fin de l'analyse de chaque cycle	En continu avec une précision de +/- 0,5 s	2
Durée d'enregistrement	5h minimum	1
FP7.9 : Permettre à l'utilisateur de contrôler l'état de fonctionnement à travers des signaux acquis par le système d'acquisition.		
Visualisation de contrôle	Interface utilisateur type « labview » avec voyants et indicateurs de fonctionnement. En temps réel avec un retard inférieur à 100ms	2
Type de control au cas d'un dysfonctionnement	Arrêt du fonctionnement de l'instrument tout de suite (< 1 s)	0
FC7.1 : Ne pas polluer l'échantillon d'air prélevé.		
Ne pas absorber les éléments à analyser. Ne pas rejeter des composants dans l'échantillon.	Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0
Étanchéité du réservoir	Aucune fuite	0
FC7.2 : S'adapter aux sources d'alimentation.		
Type d'alimentation	Référencer à l'alimentation d'avion (28V DC et 220V/50Hz)	2
Consommation	Minimum possible	3
FC7.3 : Résister à l'environnement.		
Résister à la température pendant	5 - 45°C	0

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 42/65
---	---	---

l'utilisation (5h minimum)		
Résister à la vibration pendant l'utilisation (5h minimum)	Avoir un système d'amortissement si l'instrument est sensible à la vibration.	0
Résister à l'humidité pendant l'utilisation (5h minimum)	40 – 100 %	0
Résister à la corrosion	Matériaux résistant à l'air Matériaux (en contact avec l'échantillon) inertes aux COV et COVO.	0
FC7.4 : Ne pas nuire à l'environnement.		
Evacuation d'air analysé et d'air restant	A l'extérieur de l'avion	0
Rejet de matière polluante	Aucune	0
Fuite de gaz toxique, inflammable	Aucun	0
Dégagement de chaleur	< 50°C	2
Bruit sonore	< 87 dB selon [Mieux estimer le bruit perçu par les salariés Note] INRS (2008 02 28)	0

6.2.8. Gestion des données

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP8.1 : Permettre de rapatrier les données en cours de mesures et à la fin des campagnes		
Transmission des données de mesures pour le fonctionnement au sol	En temps réel avec un retard inférieur à 1 s	2
Transmission des données de mesures pour le fonctionnement en avion	A la fin de campagne de mesure	2

6.2.9. Maintenance

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP9.1 : Permettre à l'opérateur de remplacer les pièces d'usure au moyen d'outils.		
Nombre de pièces d'usure	Minimum possible	3
Standardisation des pièces d'usure	Maximum	3
Fréquence des opérations de changement de pièces	2 ans	2
Accessibilité aux pièces d'usure	Maximum	3
Coût des pièces d'usure	Minimum	3
FC9.1 : Résister aux produits d'entretiens.		
Résistance chimique de la surface extérieure et intérieure	Pas de réaction chimique entre les produits d'entretiens et les surfaces	2
Résistance à l'abrasion de la surface extérieure et intérieure	Pas d'abrasion aux surfaces	2

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 43/65
---	---	--

6.2.10. Transports

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP10.1 : Permettre d'être transporté facilement par l'utilisateur ou un transporteur.		
Poignée de transport	Minimum 2 si l'instrument est < ou = 50 Kg Minimum 4 si l'instrument est > 50 Kg	2
FC10.1 : Résister au transport.		
Résister à la pression pendant le transport	700-1000 hpa	2
Résister à l'humidité pendant le transport	20 - 100%	2
Résister à la température pendant le transport	0 - 50°C	2
Résister aux chocs pendant le transport	Avoir un emballage de protection pour diminuer au maximum le risque de chocs.	3

6.2.11. Stockage

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP11.1 : Permettre d'être stocké dans un lieu de stockage.		
Nombre de composants non stockables dans les lieux de stockage prédéfinis	0	0
FC11.1 : Résister à l'environnement.		
Résister à la température pendant le stockage	0 - 50°C	2
Résister à l'humidité pendant le stockage	20 - 100%	2

6.2.12. Recyclage

Critère d'acceptation	Niveau du critère d'acceptation	Flexibilité
FP12.1 : Etre démonté par l'opérateur à l'aide d'outils.		
Démontabilité	Maximum	3
Séparabilité des matériaux	Maximum	3
Nombre de matériaux	Minimum	3
FC12.1 : Respecter l'environnement.		
Nombre de matériaux recyclables	Maximum	3
Nombre de matériaux recyclés	Maximum	3
FC12.2 : Etre dépollué facilement par l'opérateur.		
Quantité de polluants	Minimum	3
Nombre de polluants	Minimum	3

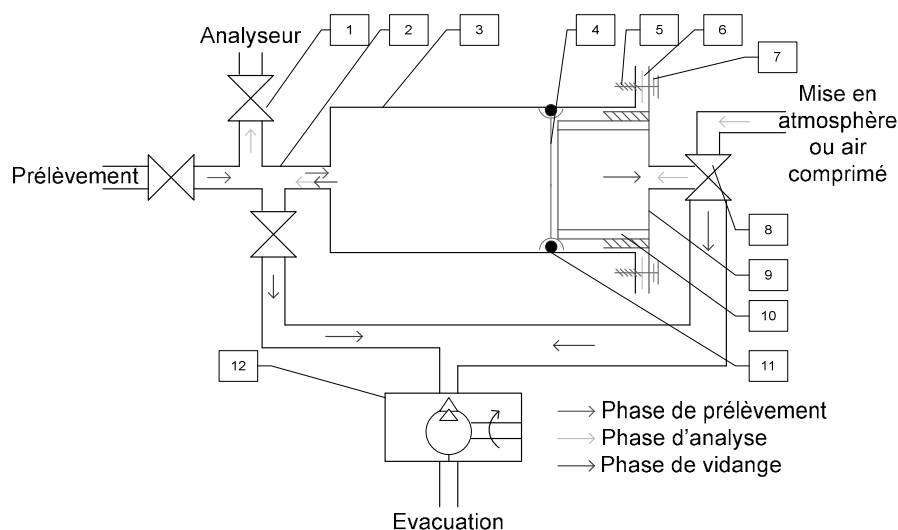
	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 44/65
---	---	--

7. VOIES TECHNOLOGIQUES

Ce paragraphe identifie quelques voies technologiques possibles pour les principales fonctions identifiées.

7.1. Préconcept A : Piston

Schéma de fonctionnement :

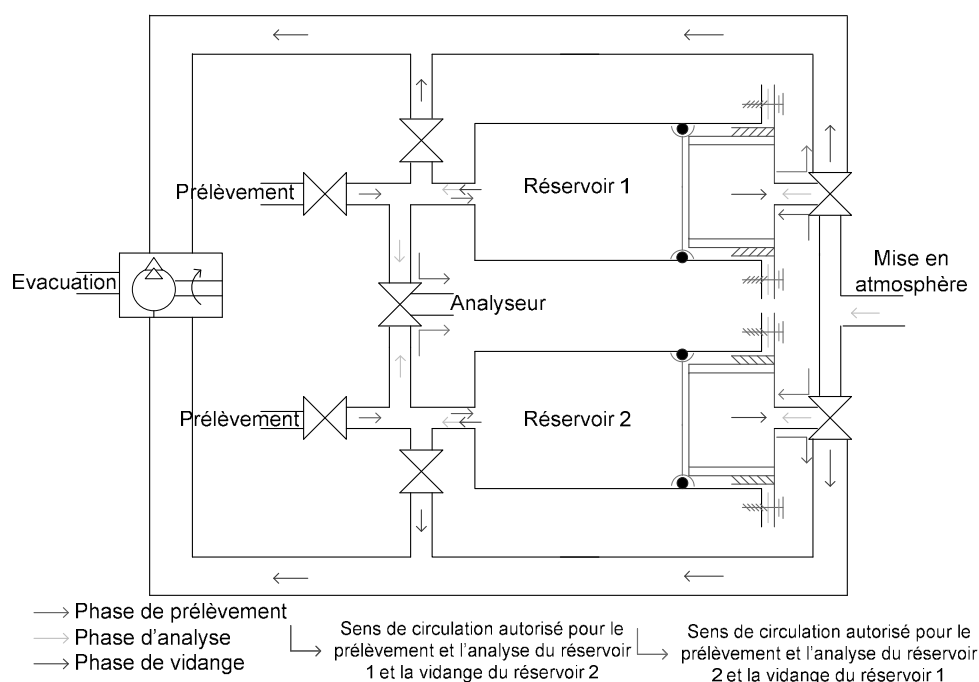


Nomenclature :

12	1	Pompe à vide	AD
11	1	Joint de piston	AD
10	1	Butée filetée	AD
9	1	Carter	Inox (AD)
8	1	Electrovanne à 3 voies	AD
7	4	Rondelle plate (AD)	AD
6	4	Joint d'étanchéité	AD
5	4	Vis de fixation (AD)	Inox (AD)
4	1	Piston (DN AD)	Inox (AD) ou téflon
3	1	Réservoir (Volume AD)	Inox 316L
2	AD	Tuyauterie avec T (DN AD)	Téflon
1	3	Electrovanne à 2 voies	AD
REP.	NB.	DESIGNATION	MATIERE

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 45/65</p>
---	---	---

Schéma avec 2 réservoirs :



Note : La réalisation du schéma est d'abord basée sur un réservoir de prélèvement pour présenter l'idée de conception. L'idée d'utiliser deux réservoirs de prélèvement est pour augmenter la cadence du prélèvement des échantillons. Pendant l'analyse du réservoir 1, le réservoir 2 est en train d'être vidé. Inversement, pendant l'analyse du réservoir 2, le réservoir 1 est en phase de vidange. Mais le choix d'utiliser deux réservoirs est à justifier lors de l'optimisation du système tout en respectant le CDCF en fonction du besoin de la cadence du prélèvement.

Phase de prélèvement (flux en couleur bleue) :

Les échantillons d'air sont aspirés dans le réservoir pré-vidé à 25-40mbar. Il n'y a que l'électrovanne de prélèvement, qui est ouverte à cette phase.

Phase d'analyse (flux en couleur jaune) :

L'électrovanne d'analyse s'ouvre pour que l'échantillon soit aspiré dans l'analyseur. La vanne (REP.8) s'ouvre à la mise en atmosphère afin d'avoir une pression atmosphérique au fond du réservoir (coté droit du piston). Lors de la chute de pression dans le réservoir pendant l'analyse, le piston se déplacera pour que la pression des échantillons reste constante. Du fait que la force de frottement entre le joint du piston et la paroi du réservoir ne sera jamais nulle, la pression des échantillons sera légèrement inférieure à P_{atm} mais **constante**. Une autre alternative est d'utiliser

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 46/65</p>
---	---	--

une bouteille d'air comprimé au lieu de l'air atmosphérique. La pression de l'air comprimé sera maintenue de telle sorte que la force de frottement sera compensée.

Phase de vidange (flux en couleur rouge) :

Toutes les vannes sont fermées sauf celles liées à la pompe à vide. L'idée est de pouvoir aspirer plus vite (ou plus tôt) du côté de la vanne à trois voies afin de pouvoir repositionner le piston contre la butée (REP.10). Le déplacement du piston fait en même temps le vide dans le réservoir, ce qui diminue la différence de pression des deux côtés de piston pour éviter le choc avec la butée. Cette dernière est changeable de façon à ce que le volume des échantillons d'air soit réglable.

Avantages :

- Volume des échantillons prélevés réglable.
- Simplicité du système.
- Pas de volume mort (volume restant du cycle précédent).
- Repositionnement automatique du piston pendant la vidange.

Inconvénients :

- Fabrication spécifique du réservoir.
- Nécessité de maintenance pour le piston et le joint.

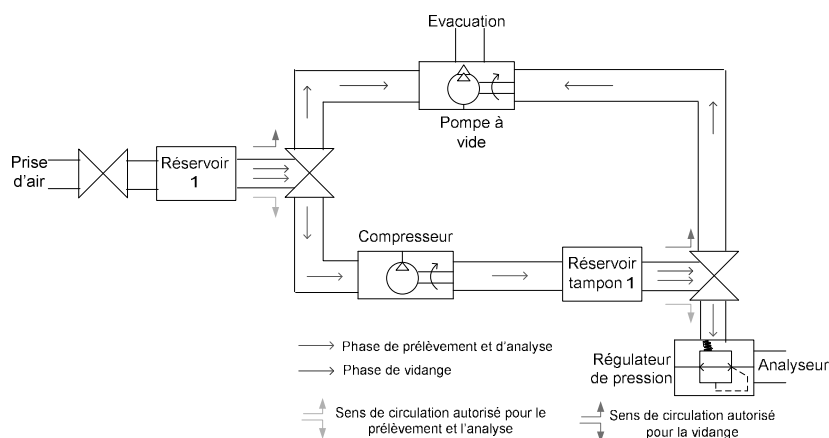
Difficultés :

- Minimiser le frottement entre la paroi du réservoir et le joint du piston afin de pouvoir équilibrer la pression correctement et rapidement.
- Maîtriser le débit de vidange des deux côtés, le temps de vidange, les efforts, et la synchronisation des vannes de vidange pour repositionner le piston correctement.

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 47/65</p>
---	---	---

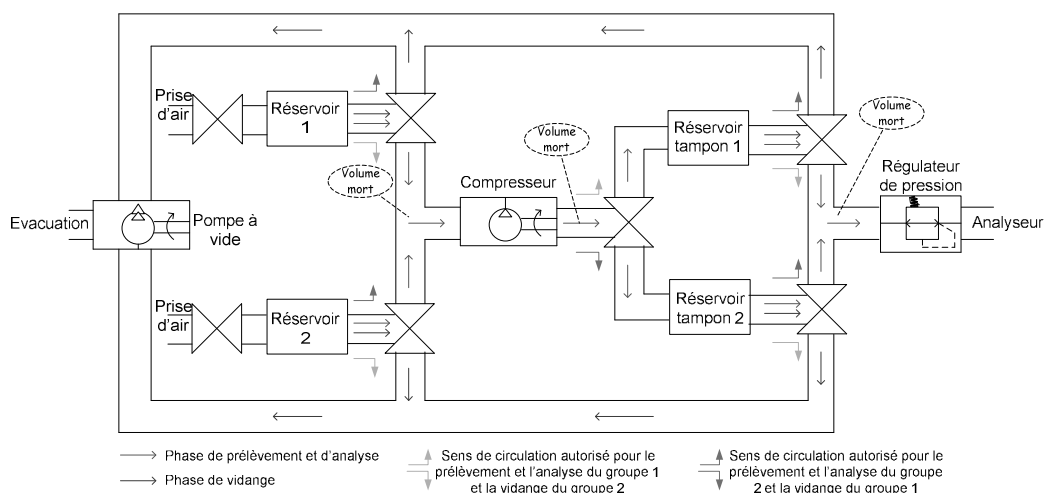
7.2. Préconcept B : Régulateur de pression (ou débit)

Schéma de fonctionnement :



L'idée est d'utiliser le régulateur de pression en amont de l'analyseur qui permet de réguler la pression des échantillons à Patm. En amont du régulateur, la pression doit être supérieure à Patm pour pouvoir créer une pression égale à Patm en aval. Le problème peut être résolu par utilisation d'un compresseur en amont des réservoirs tampon 1&2 qui permet de créer une surpression dans ces derniers.

Schéma avec 2 réservoirs :





CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"

Ref : 0110 DECA 00001 CC

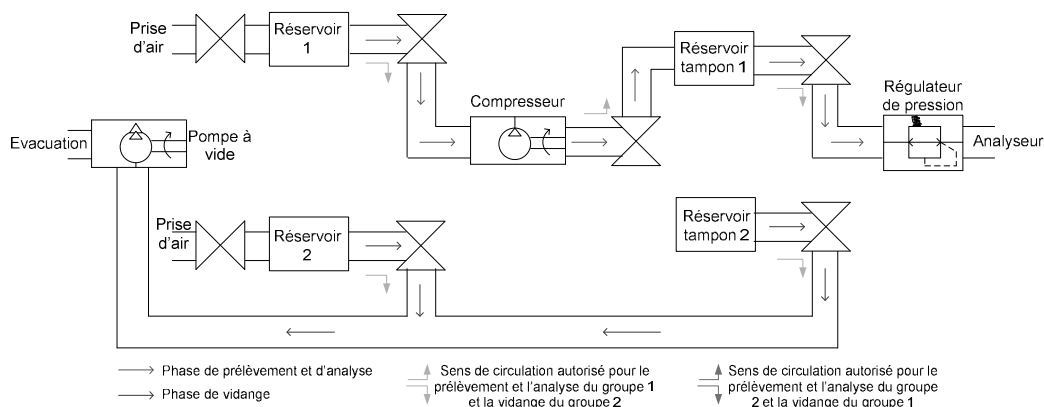
Ed. 1.0 Rev. 10

Date : 22/07/09 Page : 48/65

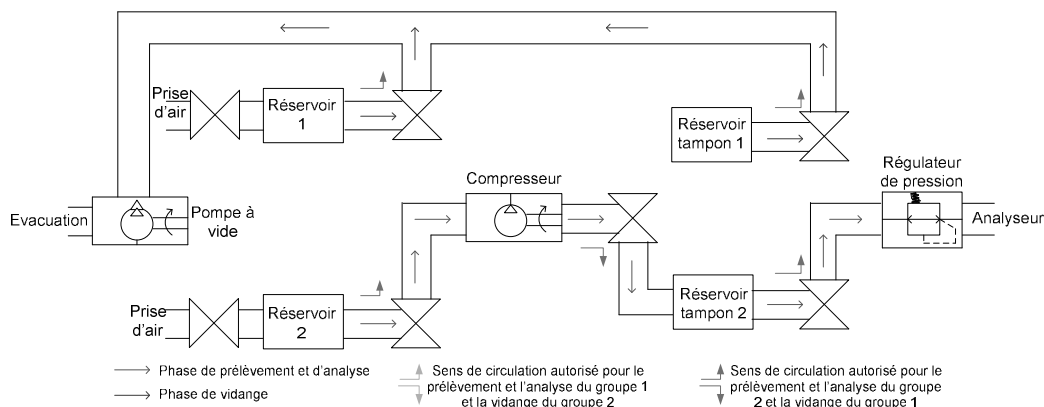
Concernant le système avec deux réservoirs, pendant l'analyse du réservoir 1, le réservoir 2 et tampon 2 sont en train d'être vidés. Inversement, pendant l'analyse du réservoir 2, le réservoir 1 et tampon 1 sont en phase de vidange. Mais le choix d'utiliser deux réservoirs est à justifier auprès du CDCF en fonction du besoin de la cadence du prélèvement.

Schéma de fonctionnement par phase à 2 réservoirs :

Prélèvement et analyse du groupe 1 et vidange du groupe 2



Prélèvement et analyse du groupe 2 et vidange du groupe 1



Note : Entre ces deux phases, une partie des échantillons est restée dans la tuyauterie et n'a pas pu être vidée (voir « schéma avec 2 réservoirs »)

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 49/65</p>
---	---	--

Avantages :

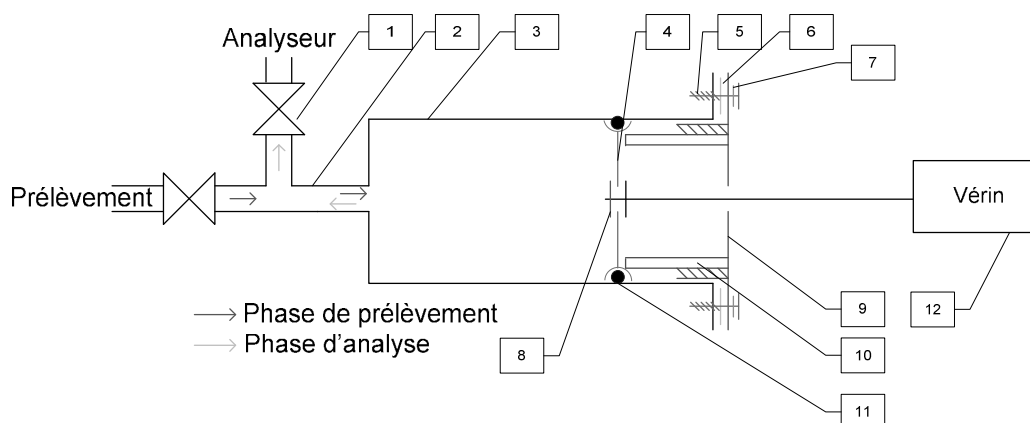
- Pas de retouche mécanique sur le(s) réservoir(s) de prélèvement.
- Système composé par seulement des pièces standards. Sans fabrications particulières.

Inconvénients :

- Complexité du système (compresseur, tampon, circuits de tuyauterie, régulateur de pression).
- Volume mort des échantillons non optimisé.
- Volume des échantillons prélevés non réglable.
- Volume des échantillons prélevés doit être largement supérieur au volume analysé à cause du volume pressurisé dans le tampon.
- Moins de rapidité pour tout le système à cause de la pressurisation dans le(s) tampon(s).
- Plus d'éléments à contrôler pour maîtriser l'état du fonctionnement.

Difficultés :

- Tout le système ne doit pas dépasser la baie ATR-42 (optimisation du dimensionnement).
- Synchronisation du système en fonction du fonctionnement du temps de réponse de tout le système.
- Garantir à la fois la pression et le débit en amont de l'analyseur.
- Choix de régulateur de pression et compresseur tout en maîtrisant le débit et la pression dans tout le système.

7.3. Préconcept C : vérinSchéma de fonctionnement :

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 50/65
---	---	--

Nomenclature :

12	1	Vérin (pneumatique/électrique/hydraulique)	AD
11	1	Joint de piston	AD
10	1	Butée fileté	AD
9	1	Carter	Inox (AD)
8	2	Contre Ecrous	Inox (AD)
7	4	Rondelle plate (AD)	AD
6	4	Joint d'étanchéité	AD
5	4	Vis de fixation (AD)	Inox (AD)
4	1	Piston (DN AD)	Inox (AD) ou téflon
3	1	Réservoir (Volume AD)	Inox 316L
2	AD	Tuyauterie avec T (DN AD)	Téflon
1	3	Electrovanne à 2 voies	AD
REP.	NB.	DESIGNATION	MATIERE

Phase de prélèvement (flux en couleur bleue) :

Les échantillons d'air sont aspirés dans le réservoir pré-vidé à 25-40mbar. Il n'y a que l'électrovanne de prélèvement, qui est ouverte à cette phase.

Phase d'analyse (flux en couleur jaune) :

L'électrovanne d'analyse s'ouvre pour que l'échantillon soit aspiré dans l'analyseur. Le vérin exerce sur le piston une force ($F_{atm} + F_{frottement}$) pour que le piston se déplace lors de la chute de pression dans le réservoir pendant l'analyse. Ainsi la pression des échantillons reste constante et égale à P_{atm} .

Phase de vidange:

A la fin de l'analyse, il restera peu d'échantillon dans le réservoir. Le vide sera fait grâce au déplacement du piston vers le fond du réservoir (même principe de fonctionnement d'une seringue).

Avantages :

- Volume des échantillons prélevés réglable.
- Simplicité du système.
- Non nécessité d'une pompe à vide.
- Repositionnement du piston par tirage du vérin.

Inconvénients :

	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE PRÉLEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AÉROPORTE "MEDEE"	Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date :22/07/09 Page : 51/65
---	---	--

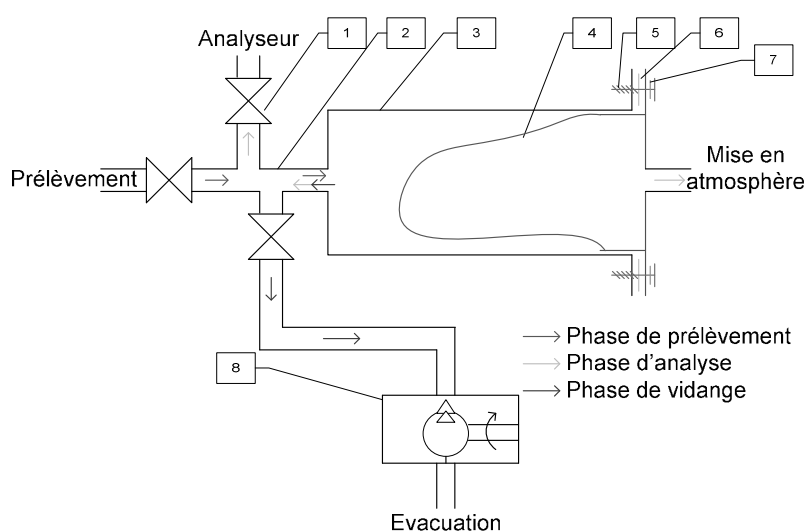
- Fabrication spécifique du réservoir.
- Nécessité de maintenance pour le piston et le joint.
- Utilisation de source pneumatique ou hydraulique au cas du vérin pneumatique ou hydraulique.

Difficultés :

- Choix de vérin (pneumatique, hydraulique et électrique).
- Paramétrer les efforts et les courses de vérin dans les deux sens.
- Maîtriser le volume d'air restant afin de créer un vide correct.

7.4. Préconcept D : Ballon gonflable

Schéma de fonctionnement :



Nomenclature :

8	1	Pompe à vide	AD
7	4	Rondelle plate (AD)	AD
6	4	Joint d'étanchéité	AD
5	4	Vis de fixation (AD)	Inox (AD)
4	1	Ballon gonflable (AD)	Téflon ou autre (AD)
3	1	Réservoir (Volume AD)	Inox 316L
2	AD	Tuyauterie avec T (DN AD)	Téflon
1	3	Electrovanne à 2 voies	AD
REP.	NB.	DESIGNATION	MATIERE

	<p align="center">CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT D'AIR DE L'INSTRUMENT AEROPORTE "MEDEE"</p>	<p>Ref : 0110 DECA 00001 CC Ed. 1.0 Rev. 10 Date : 22/07/09 Page : 52/65</p>
---	---	--

Phase de prélèvement (flux en couleur bleue) :

Les échantillons d'air sont aspirés dans le réservoir pré-vidé à 25-40mbar. Seule l'électrovanne de prélèvement est ouverte à cette phase.

Phase d'analyse (flux en couleur jaune) :

L'électrovanne d'analyse s'ouvre pour que l'échantillon soit aspiré dans l'analyseur. Le ballon se gonfle lors de la chute de pression dans le réservoir pendant l'analyse. Ainsi la pression des échantillons reste constante et égale à P_{atm} .

Phase de vidange (flux en couleur rouge) :

A la fin de l'analyse, il restera peu d'échantillon dans le réservoir. Le vide sera fait grâce à la pompe à vide.

Avantage :

- Volume des échantillons prélevés réglable selon taille de ballon.
- Simplicité du système.

Inconvénient :

- Fabrication spécifique du réservoir.
- Courte durée de vie de ballon.
- Inertie chimique.

Difficultés :

- Choix du ballon (matériaux, taille, élasticité).
- Maîtriser la pression nécessaire pour le gonflement et dégonflement du ballon.
- Maîtriser le temps de prélèvement lié aux caractéristiques du ballon.

Résumé

Les Composés Organiques Volatils (COV) jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère et participent à la formation de polluants secondaires comme l'ozone et les aérosols organiques.

Les émissions biogéniques de COV dominent d'un facteur dix les émissions anthropiques à l'échelle globale mais leur caractérisation à l'échelle régionale est incertaine. Les progrès en modélisation de la chimie atmosphérique passent par l'amélioration des inventaires d'émissions, ce qui nécessite des mesures de flux in situ. Ces travaux portent sur l'étude des émissions de COV biogéniques par les végétations méditerranéennes dans le cadre du programme ChArMEx (Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment) qui vise à concentrer les efforts scientifiques sur l'étude de la chimie et des aérosols de l'atmosphère du bassin méditerranéen.

La méthode Eddy Covariance (EC) permet de quantifier directement les échanges d'espèces chimiques entre la surface et l'atmosphère. Cette méthode constitue une référence pour les mesures de flux mais n'est applicable qu'à un nombre limité d'espèces car elle requiert la mesure rapide ($\sim 0,1$ s) et simultanée de la concentration du composé étudié ainsi que de la vitesse du vent vertical. Afin d'élargir le champ de mise en œuvre de cette technique d'autres solutions dérivées de l'EC ont été proposées, dont la méthode Disjunct Eddy Covariance (DEC) qui a pour particularité de réduire la contrainte sur la mesure rapide de l'espèce chimique tout en gardant une précision acceptable sur le calcul du flux.

Dans le cadre de ces travaux de thèse un système de prélèvement a été développé pour mettre en œuvre la mesure de flux de COV par la méthode DEC. Ce dispositif appelé MEDEE (Mesures par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace) repose sur une technologie nouvelle qui permet une capture rapide d'un échantillon d'air et assure son transfert à pression constante vers un analyseur connecté en ligne. Il est composé de deux "seringues mécaniques" actionnées par des vérins électriques dont le fonctionnement est alterné pour alimenter en continu l'analyseur. Trois électrovannes disposées à l'entrée de chaque réservoir dirigent le flux d'air en fonction du cycle de fonctionnement. L'ensemble du système est cadencé par un microcontrôleur avec une précision à la milliseconde. Le système de prélèvement a été réalisé en matériaux inertes chimiquement pour éviter la dégradation de l'échantillon et être compatible avec les espèces en trace réactives.

MEDEE a été testé et validé pour les mesures de flux au sol et en avion lors de deux campagnes de terrain. Le système MEDEE a ainsi permis, lors de deux campagnes de mesures pendant les étés 2010 et 2011 au-dessus d'une forêt de chênes pubescents, de mesurer les flux d'isoprène grâce à un couplage avec un analyseur adapté (Fast Isoprene Sensor).

Un réseau de neurones artificiels (RNA) a ensuite été utilisé pour déterminer une paramétrisation des flux d'isoprène en fonction des paramètres environnementaux à partir des observations des campagnes de mesures. La modélisation des émissions d'isoprène a été validée pour les conditions environnementales rencontrées. Cette paramétrisation servira dans un modèle de chimie atmosphérique à l'étude de l'impact des émissions de COV biogéniques sur la qualité de l'air.

mots clés : *composés organiques volatils biogéniques, COVB, mesures de flux, émissions, isoprène, Quercus Pubescens, disjunct eddy covariance, DEC*